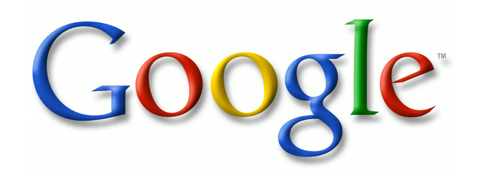
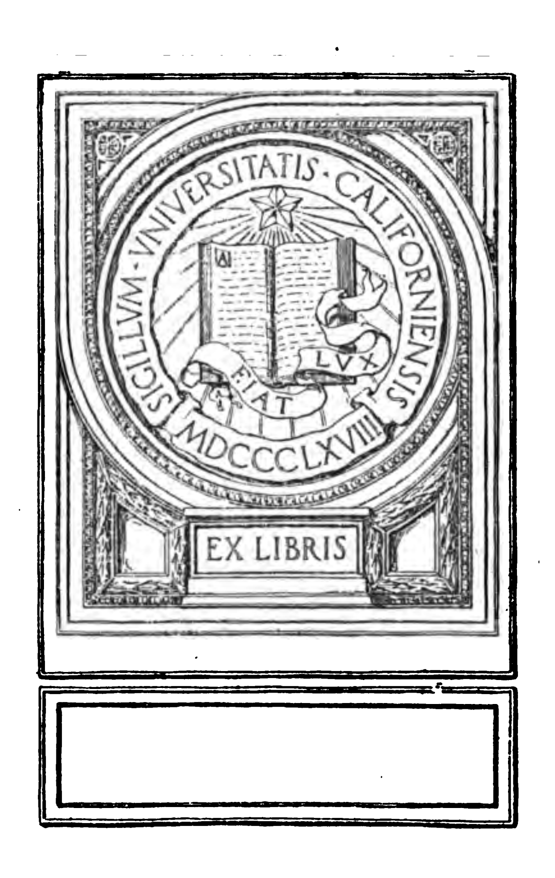
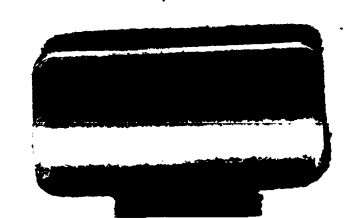



UC-NRLF
$B 24 075
YC 10771


SIGILLVM · VNIVERSITATIS · CALIFORNIENSIS
FIAT LVX
MDCCCLXVIII
EX LIBRIS



Radioaktivität und die neueste Entwicklung der Lehre von den chemischen Elementen

Von

Dr. K. Fajans

a. o. Professor für physikalische Chemie an der Universität München

Zweite durchgesehene und ergänzte Auflage

Mit 9 Abbildungen und 10 Tabellen



Druck und Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn in Braunschweig

1920

Herausgeber dieses Heftes:
Geh. Rat Prof. Dr. K. Scheel, Berlin.

Seiner Excellenz

Herrn Wirkl. Geh.-Rat Prof. Dr. Carl Engler

und

Herrn Prof. Dr. Georg Bredig

in dankbarer Erinnerung
an die Karlsruher Jahre

gewidmet

Aus dem Vorwort zur ersten Auflage.

In den letzten Jahren wurde ich öfters aufgefordert, vor Hörern sehr verschiedenen Bildungsgrades über die Ergebnisse zu berichten, die die Chemie und insbesondere die Lehre von den chemischen Elementen der radioaktiven Forschung verdankt. Das große Interesse, das diesen Fragen entgegengebracht wird, veranlaßt mich, in dem vorliegenden Bändchen einen Überblick über das genannte Thema zu geben.

Da über die ältere Entwicklung des Gebietes, die dem Studium der radioaktiven Umwandlungen der Elemente galt, zahlreiche auch populäre Schriften vorliegen, habe ich die Umwandlungstheorie verhältnismäßig kurz behandelt und das Hauptgewicht auf die neuere Lehre von den isotopen Elementen gelegt, wobei auch die wichtigsten Ergebnisse der Spektroskopie der Röntgenstrahlen und der Erforschung der Atomstruktur gestreift wurden.

Die Darstellung wurde auf einem solchen Niveau gehalten, daß sie (bis auf ganz wenige spezielleren Fragen gewidmete Abschnitte) wohl jedem Leser, dem die Grundlagen der Physik und Chemie bekannt sind, verständlich sein dürfte. Ich hoffe aber, daß das Büchlein auch physikalischen und chemischen Fachmännern willkommen sein wird, die die rasche Entwicklung des Gebietes nicht selbst an der Hand der Originalliteratur verfolgen können.

Es wäre bei dem zur Verfügung stehenden Raum nicht möglich, das Thema zu erschöpfen, doch wurde auf die wichtigsten neueren Arbeiten, falls sie nicht im Text besprochen werden konnten, wenigstens in den Literaturangaben hingewiesen.

Es gibt wohl nur wenige Probleme der Chemie, die ein so dankbares Thema für theoretische Spekulationen bieten, wie die in dieser Schrift behandelten. Wenn ich es hier vermieden habe, der Phantasie freien Lauf zu lassen, so geschah

es nicht aus prinzipieller Ablehnung der sich oft aufdrängenden hypothetischen Überlegungen, sondern deshalb, weil ich glaubte, bei der durch den kleinen Umfang der Schrift notwendigen strengeren Auswahl des Stoffes den feststehenden bereits so mannigfaltigen Tatsachen den Vorzug geben zu müssen und dies um so mehr, als diese gerade auf dem behandelten Gebiete zum Teil die kühnsten Träume an Schönheit übertreffen.

München, Juni-Juli 1919.

Kasimir Fajans.

Vorwort zur zweiten Auflage.

Als bedeutsamster Fortschritt seit dem Erscheinen der ersten Auflage ist die Vervollkommnung der Kanalstrahlenanalyse durch F. W. Aston zu verzeichnen, mit deren Hilfe ihm u. a. der Nachweis geglückt ist, daß das gewöhnliche Chlor ein Gemisch zweier isotoper Elemente vorstellt. Das frühere dieser analytischen Methode gewidmete Kapitel X „Neon und Metaneon“ konnte eine erfreuliche Erweiterung erfahren und hat den allgemeinen Titel „Isotopie bei gewöhnlichen Elementen“ erhalten.

Der in der vorhergehenden Auflage der Zerlegung des Stickstoffatoms gewidmete „Nachtrag“ wurde als Kapitel XIII in den Text aufgenommen, das Kapitel „Revision des Begriffes des chemischen Elementes“ den neuesten Fortschritten entsprechend teilweise umgearbeitet. Die Figuren 8 und 9 sind neu hinzugekommen.

Die vor mehreren Jahren von mir theoretisch begründete Ansicht, daß zwischen den Isotopen in allen Eigenschaften mit Ausnahme der Kernladung gewisse, wenn auch vielfach sehr geringe Unterschiede anzunehmen sind, wurde hier mit größerem Nachdruck als in der ersten Auflage vertreten, nachdem sie letztens wichtige experimentelle Stützen gefunden hat.

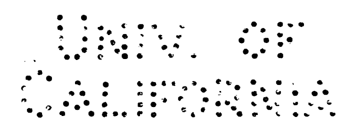
München, Anfang März 1920.

Kasimir Fajans.

Inhaltsverzeichnis.

Verzeichnis der Tabellen.

Verzeichnis der Figuren.



Einleitung.

Im Jahre 1896 entdeckte Henri Becquerel eine neue Eigenschaft der Materie — die Radioaktivität, indem er nachwies, daß Uransalze selbsttätig und ständig eine durchdringende Strahlung aussenden. Die hohe Bedeutung dieser Entdeckung leuchtete den Naturwissenschaftlern bald ein; und selbst in der Laienwelt gewann die neue Erscheinung große Popularität, als es im Jahre 1898 dem Ehepaar Curie gelang, Radiumsalze zu isolieren, welche die Strahlungsfähigkeit in bedeutend stärkerem Maße als das Uran besitzen.

Am meisten fiel es zuerst auf, daß sehr kleine Radiummengen ohne äußeres Zutun enorme Energiebeträge frei machen, deren Träger die vom Radium emittierte Strahlung ist. Befestigt man ein Röhrchen mit Radiumsalz in der Mitte eines größeren Gefäßes mit Wasser — eines Kalorimeters —, so wird die Strahlung des Radiums zum großen Teil durch das Wasser absorbiert, und man beobachtet dabei eine Wärmeentwicklung, die für 1 g Radium in der Stunde etwa 130 g-Kalorien beträgt, d. h. eine Wärmemenge, die die Temperatur von 130 g Wasser um 1^0 erhöhen kann. Und diese selbsttätige Wärmeentwicklung zeigte selbst bei mehrjähriger Beobachtung keine merkliche Verminderung, so daß man ein Perpetuum mobile vor sich zu haben glaubte. Das Prinzip der Erhaltung der Energie, das seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts das ganze naturwissenschaftliche Denken beherrscht und zu einer der Hauptgrundlagen der modernen Physik wurde, schien hier auf einen Widerspruch zu stoßen.

Wir werden bald sehen, auf welche Weise es gelungen ist, diesen scheinbaren Widerspruch aufzuklären und dadurch den radioaktiven Erscheinungen ihren revolutionären Charakter für die Physik zu nehmen. Denn trotz der vielen äußerst wertvollen Re-

sultate, die die radioaktive Forschung in das Gebäude der Physik hineingebracht hat, kann man ruhig behaupten, daß sie an dem vorher bestehenden nicht rüttelte. Dies gilt jedoch nicht für die Schwesterwissenschaft der Physik — die Chemie.

Von dieser wurden zwar die radioaktiven Erscheinungen zunächst wenig beachtet. Das wird verständlich, wenn man bedenkt, daß die Eigenart der Methoden, mit denen man die meistens nur in äußerst kleinen Mengen zugänglichen radioaktiven Substanzen untersuchen mußte, leicht zu der Vorstellung führen konnte, daß diese Stoffe eine Welt für sich bilden, die eine nur lose Verknüpfung mit der übrigen materiellen Welt besitzt. Erst allmählich wurden die innigen Zusammenhänge beider Welten immer klarer und klarer erkannt, und die Forschungen der letzten paar Jahre haben die Grenze fast vollständig verwischt und gleichzeitig ganz neue Gesichtspunkte in das Gebäude der Chemie hineingebracht.

Bei weitem die größte Bedeutung besitzt die Radioaktivität für die Lehre von den chemischen Elementen und deren Beziehungen zueinander. Die radioaktive Forschung hat der Elementenlehre für alle Zeiten ihren Stempel aufgedrückt. Wie weit hier die Konsequenzen der neuen Erkenntnisse reichen, ersieht man am besten aus der Tatsache, daß es im jetzigen Augenblick notwendig ist, einen der fundamentalsten Begriffe der Chemie, nämlich den des chemischen Elementes, vom Standpunkte der Errungenschaften radioaktiver Forschung auf seine Haltbarkeit zu prüfen.

I. Die Lehre von den chemischen Elementen vor Entdeckung der Radioaktivität.

1. Allgemeines.

Werfen wir zunächst einen Blick auf den Stand der Elementenlehre vor Entdeckung der Radioaktivität. Die alte, in der Mitte des 17. Jahrhunderts von Robert Boyle aufgestellte und dann von Lavoisier präzisierte Definition des chemischen Elementes hatte volle Geltung behalten. Man verstand unter chemischen Elementen Stoffe, die durch kein Mittel in einfachere Bestandteile zerlegt werden konnten.

Diese Definition des Elementes ist eine rein empirische; sie besagt nicht, daß ein Element ein unzerlegbarer, sondern ein unzerlegter Stoff ist (1). Es ist deshalb wichtig, sich klar zu bleiben über die Methoden, die bis vor kurzem zu der bei den Elementen Halt machenden Zerlegung der Stoffe gedient haben.

Das allgemeinste Mittel, ein kompliziertes Gemisch in seine Bestandteile zu zerlegen, basiert auf der verschiedenen Löslichkeit der Verbindungen von Elementen. Fast jedes Element weist mehrere charakteristische Reaktionen auf, die meistens auf der Schwerlöslichkeit seiner Verbindungen beruhen und die nicht nur zur Erkennung des Elementes benutzt werden und dadurch die Grundlage der qualitativen Analyse bilden, sondern auch zu seiner Trennung von allen anderen Elementen dienen können. Es gibt aber Elemente, vor allem die zur Gruppe der sogenannten seltenen Erdmetalle gehörenden (z. B. Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym usw.), die sich so sehr in ihren charakteristischen Reaktionen ähneln, daß ihre Trennung nur durch sehr langwierige fraktionierte Fällungen oder Kristallisationen ihrer Salze erzielt werden kann.

Ist man mit Hilfe der erwähnten Methoden von einem komplizierten Gemisch zu einheitlichen chemischen Verbindungen gelangt, so versucht man sie weiter zu zerlegen, entweder durch physikalische Hilfsmittel, wie starke Erhitzung, elektrischen Strom oder durch chemische Wechselwirkung mit anderen Stoffen. Auf diese Weise gelangt man schließlich zu einer beschränkten Zahl von Stoffen, die bei weiterer derartiger Behandlung niemals Produkte ergeben, die weniger wiegen als der Ausgangsstoff, und das sind eben unsere Elemente.

Eine besondere Beachtung verdient noch die eigenartige Gruppe der sogenannten Edelgase: Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon, die wegen ihres Unvermögens, mit anderen Elementen Verbindungen einzugehen, nur durch Anwendung von physikalisch-chemischen Methoden, wie fraktionierte Verflüssigung oder fraktionierte Destillation der verflüssigten Gase voneinander getrennt werden können. Schließlich sei noch erwähnt, daß die aus gewissen Gründen entstandene Frage, ob Helium ein einheitliches Element oder ein Gemisch vorstellt, dadurch im ersten Sinne ent-

schieden wurde, daß der Versuch, Helium durch fraktionierte Diffusion zu zerlegen, negativ ausfiel.

Durch alle diese Zerlegungsmethoden hatte man bis zur Zeit der Entdeckung der Radioaktivität etwa 80 chemische Elemente gefunden. Nach der üblichen Auffassung läßt sich eine bestimmte Menge eines chemischen Elementes nur in Bruchstücke spalten, die die gleichen Eigenschaften besitzen, wie der Ausgangsstoff. Diese mechanische Teilbarkeit der Elemente besitzt weiterhin nach der Atomtheorie eine Grenze, die z. B. für den Wasserstoff erreicht wird, wenn 1 g in $6{,}06 \times 10^{23}$ gleiche Teile[1]) geteilt wird, die man Wasserstoffatome nennt. Entsprechend der Zahl der bekannten Elemente nahm man die Existenz etwa 80 solcher verschiedenartiger Atome an, und aus ihnen sollte die ganze materielle Welt zusammengesetzt sein.

Die Unmöglichkeit, die Elemente zu zerlegen, bringt es mit sich, daß die einzigen Operationen, denen man das Atom eines Elementes unterwerfen kann, die Kombination mit Atomen anderer Elemente oder mit gleichartigen zu Molekeln ist; die Atome selbst bleiben aber unverändert und können immer wieder zurückgewonnen werden, so daß man den Satz von der Unzerstörbarkeit oder Erhaltung der Elemente formulieren konnte. Alle Atome eines bestimmten Elementes sind untereinander völlig gleich, sie haben vor allem gleiche Masse und gleiches Gewicht, deren relative Größe, bezogen auf das zu 16,000 festgesetzte Gewicht des Sauerstoffatoms, als das Atomgewicht (A. G.) des betreffenden Elementes bezeichnet wird.

Das Atomgewicht galt als eine besonders wichtige Eigenschaft eines Elementes. War es doch die einzige Eigenschaft, die von allen äußeren Umständen völlig unabhängig ist, eine Konstante im wahren Sinne des Wortes. Dazu kommt noch die außerordentlich große praktische Bedeutung, die dem A. G. zukommt, da es die Grundlage jeder quantitativen Analyse und chemischen Rechnung bildet.

Während das A. G. die wichtigste Eigenschaft eines Elementes ist, sobald es sich um sein Verhalten in quantitativ-chemischer Hinsicht handelt, ist für seine qualitative Erkennung neben den

---

[1]) 10^n heißt 1 mit n Nullen, z. B. 10^6 ist eine Million, 10^{-n} heißt $^1/_{10^n}$.

erwähnten charakteristischen Reaktionen das optische Spektrum als die besonders wichtige Eigenschaft anzusehen. Jedem Element kommt ein besonderes Spektrum zu, und die sonst so weitgehend ähnlichen Elemente wie die seltenen Erdmetalle oder die Edelgase, sind durch den Bau ihrer Spektren leicht zu unterscheiden.

2. Das periodische System der Elemente.

Der chemischen Zerlegungskunst gelang es also zu etwa 80 Bausteinen der Materie vorzudringen, bei welchen sie stehen bleiben mußte. Diese große Zahl macht es verständlich, weshalb man schon frühzeitig skeptisch der Ansicht gegenüberstand, daß dies die letzten ohne näheren Zusammenhang dastehenden Bausteine seien, und daß man versucht hat, wenigstens auf indirektem Wege zur Kenntnis innigerer Beziehungen zwischen den Elementen zu gelangen. Als die wichtigste Errungenschaft, zu der diese Bestrebungen im vorigen Jahrhundert geführt haben, ist das periodische System der Elemente anzusehen. Seine Aufstellung wurde durch mehrere Forscher, besonders de Chancourtois (1862) und J. Newlands (1864) angebahnt, aber erst durch Lothar Meyer und Dmitri Mendelejeff im Jahre 1869 vollendet (2). Die Tabelle 1 zeigt den Stand des periodischen Systems vor Entdeckung der Radioaktivität.

Beim Aufbau des Systems wurde zu seiner Grundlage das Atomgewicht der Elemente gewählt. Das periodische System besagt nämlich, daß, wenn man die chemischen Elemente in Reihenfolge ihrer Atomgewichte anordnet, in gewissen regelmäßigen Abständen — Perioden — Elemente mit ähnlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften auftreten.

Wenn man z. B. beginnend mit dem Alkalimetall Lithium, das dem Edelgase Helium folgt, die Elemente der zweiten horizontalen Reihe nacheinander betrachtet, so begegnet man Stoffen, deren chemischer Charakter immer mehr von dem des Lithiums abweicht und findet in dem Halogen Fluor den vollen Gegensatz zum Alkalimetall. Der nächste Schritt führt aber wieder zu einem Edelgas (Neon), dem wiederum ein Alkalimetall (Natrium) folgt, und es sind nun alle weiteren Elemente der dritten Reihe chemisch ähnlich den über ihnen stehenden Elementen der zweiten Reihe. So ist

Reihen	Gruppen der Elemente 0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	—	H 1,008	—	—	—	—	—	—	
2	He 4,00	Li 6,94	Be 9,1	B 11,0	C 12,00	N 14,01	O 16,00	F 19,0	
3	Ne 20,2	Na 23,00	Mg 24,32	Al 27,1	Si 28,3	P 31,04	S 32,06	Cl 35,46	
4	A 39,88	K 39,10	Ca 40,07	Sc 45,1	Ti 48,1	V 51,0	Cr 52,0	Mn 54,93	Fe 55,84 Co 58,97 Ni (Cu) 58,68
5		Cu 63,57	Zn 65,37	Ga 69,9	Ge 72,5	As 74,96	Se 79,2	Br 79,92	—
6	Kr 82,92	Rb 85,45	Sr 87,63	Y 88,7	Zr 90,6	Nb 93,5	Mo 96,0	—	Ru 101,7 Rh 102,9 Pd (Ag) 106,7
7		Ag 107,88	Cd 112,4	In 114,8	Sn 118,7	Sb 120,2	Te 127,5	J 126,92	—
8	Xe 130,2	Cs 132,81	Ba 137,37	La 139,0	Ce 140,25	—	—	—	— — —
9		—	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	—	Yb 173,5	—	Ta 181,5	W 184,0	—	Os 190,9 Ir 193,1 Pt (Au) 195,2
11		Au 197,2	Hg 200,6	Tl 204,0	Pb 207,20	Bi 208,0	—	—	
12	—	—	—	—	Th 232,15	—	U 238,2		
	Höchste salzbildende Oxyde								
	R	R_2O	RO	R_2O_3	RO_2	R_2O_5	RO_3	R_2O_7	RO_4
	Höchste gasförmige Wasserstoffverbindungen								
					RH_4	RH_3	RH_2	RH	

[1]) Aus der 7. Auflage der „Grundlagen der Chemie" (russisch) von D. Mendelejeff, mit jetzt geltenden Atomgewichten. Die Bedeutung der Symbole der Elemente findet man in der Tabelle 10.

z. B. das Halogen Chlor weitgehend analog dem Fluor. Ähnliches, wenn auch mit gewissen Besonderheiten und Ausnahmen, wiederholt sich bis ans Ende der Tabelle.

Die ähnlichen Elemente sind in der Tabelle in vertikalen Reihen angeordnet, und sie bilden die acht Gruppen des Systems, jede eingeteilt in zwei Untergruppen[1]). So weisen z. B. in der zweiten Gruppe, deren sämtlichen Gliedern die Zweiwertigkeit gemeinsam ist, die Elemente Be, Mg, Ca, Sr und Ba (vgl. Tabelle 9) einerseits und Zn, Cd, Hg andererseits mehr Analogien zueinander als zu den Elementen der anderen Untergruppe (3).

Der Grundgedanke des Systems läßt sich auch so ausdrücken, daß die Eigenschaften der Elemente periodische Funktionen ihrer Atomgewichte sind. — Das Atomgewicht wird danach als diejenige Eigenschaft betrachtet, von der in erster Linie die meisten übrigen abhängen. Außer dieser Errungenschaft war wohl als das wertvollste Ergebnis der Aufstellung des Systems die Möglichkeit der Vorhersagung der Zahl der noch zu entdeckenden Elemente anzusehen. Denn jedes Element mußte im System seinen Platz finden, und die Zahl der Stellen des Systems soll der Zahl der überhaupt existierenden Elemente entsprechen. Bekanntlich hat diese Idee durch die Entdeckung der Elemente Scandium, Gallium und Germanium, deren Plätze zur Zeit der Aufstellung des periodischen Systems noch frei waren, eine glänzende Bestätigung erfahren. Erhebliche Schwierigkeiten bereitete die Durchführung dieses Gedankens nur im Gebiete der seltenen Erdmetalle, worauf, wie auch auf einige andere Besonderheiten des Systems, später noch eingegangen wird.

Welche tieferen Ursachen die periodische Wiederkehr der Eigenschaften der Elemente bedingen, ist eine Frage, auf die wir auch jetzt, 50 Jahre nach Entdeckung dieser Gesetzmäßigkeit eine bündige Antwort schuldig bleiben. Wir wissen nicht genau (4), weshalb das System der Elemente ein periodisches ist. Die Erkenntnis jedoch, daß es überhaupt ein System der Elemente gibt, war der große Gewinn der Mendelejeffschen Entdeckung. Denn

[1]) Wie später (S. 46 und Tabelle 9) noch gezeigt wird, empfiehlt es sich, auch die in der Tabelle getrennten Gruppen 0 und VIII als Untergruppen einer gemeinsamen Gruppe zu betrachten.

sie zeigte überzeugend, daß die Elemente etwas mehr gemeinsam haben müssen, als das ihnen allen eigene widerspenstige Verhalten gegenüber der Zerlegungskunst der Chemiker. Die alte Idee einer allen Elementen zugrunde liegenden Urmaterie wurde wieder wach. Doch mußte man gleichzeitig aus dem Bestehen des natürlichen Systems folgern, daß, falls die Elemente wirklich zusammengesetzt sein sollten, die Art ihrer Zusammengesetztheit wesensgleich sein muß.

Wir brauchen hier nicht zu erörtern, welche Formen die durch das periodische System neubelebten Spekulationen über die zusammengesetzte Natur der Elemente angenommen hatten, doch sei an die erste im Jahre 1815 von dem englischen Arzt W. Prout aufgestellte Hypothese dieser Art erinnert, nach welcher der Wasserstoff die allen Elementen gemeinsame Urmaterie ist. Prout stellte sich alle schwereren Atome aus einer ganzen Zahl von Wasserstoffatomen zusammengesetzt vor und behauptete, daß in Übereinstimmung mit dieser Vorstellung die Atomgewichte aller Elemente ganze Vielfache vom A. G. des Wasserstoffes seien. Ein Blick auf die in der Tabelle 1 angegebenen Atomgewichte lehrt jedoch, daß, wenn dies auch bei einer Anzahl von Elementen sehr annähernd erfüllt ist, in vielen anderen Fällen die Abweichungen unzweideutig die Unsicherheit der Atomgewichtswerte überschreiten. Daß trotzdem die Proutsche Idee wohl nicht weit von der Wahrheit entfernt ist, ergibt sich aus den neuen Gesichtspunkten, die die radioaktive Forschung in die Lehre von den chemischen Elementen hineingebracht hat.

II. Die radioaktiven Umwandlungen der Elemente.

1. Radioaktivität als Wegweiser bei Entdeckung neuer Elemente.

Das erste wichtige Ergebnis, das die Entdeckung der Radioaktivität für die Elementenforschung gezeitigt hat, war die Einführung einer prinzipiell neuen Methode zur Auffindung von Elementen.

Wie Becquerel zeigte, emittieren Uranpräparate durchdringende Strahlen, die die photographische Platte schwärzen, fluoreszierende

Substanzen zum Leuchten bringen und Luft zum Leiter der Elektrizität machen oder, wie man sagt, ionisieren. Die Stärke dieser ionisierenden Wirkung und damit auch die Intensität der radioaktiven Strahlung läßt sich messen, wenn man die Geschwindigkeit der Entladung eines geladenen Elektroskops oder Elektrometers bestimmt. Nun wies Marya Curie-Sklodowska mit Hilfe dieser Methode nach, daß die radioaktive Wirkung der verschiedenen Uransalze ihrem Urangehalte proportional ist, daß also die Radioaktivität dem Elemente Uran zukommt und eine Atomeigenschaft vorstellt, die unabhängig vom chemischen Bindungszustande des Uranatoms ist.

a) Entdeckung und Eigenschaften des Radiums.

Diese Erkenntnis hat bald reiche Früchte getragen. Denn nachdem Frau Curie festgestellt hatte, daß Uranmineralien eine stärkere Aktivität aufweisen, als ihrem Urangehalt entspricht, folgerte sie daraus, daß in diesen Mineralien außer dem Uran mindestens noch ein anderes stark aktives Element enthalten sein muß. Herr und Frau Curie haben deshalb die Uranpechblende einer systematischen chemischen Analyse unterzogen mit dem Ziele, ein neues radioaktives Element daraus zu isolieren. Die mit Hilfe des Elektrometers ausgeführten Messungen der Intensität der Strahlung verschiedener Fraktionen dienten als Führer bei der chemischen Trennungsarbeit, und es gelang (1898) in der Tat, einen beträchtlichen Teil der Aktivität des Minerals beim Barium zu konzentrieren. Eine weitere scharfe Abtrennung des Trägers der Radioaktivität vom Barium ließ sich durch kein Reagens erzielen, und es wurde deshalb zu dem bei Besprechung der seltenen Erdmetalle bereits erwähnten Trennungsmittel gegriffen, zur fraktionierten Kristallisation der Salze. Auf diese Weise ließ sich die Radioaktivität immer weiter und weiter konzentrieren, und schließlich gelangte man zu Produkten, deren Aktivität pro Gewichtseinheit mehr als das Millionenfache der Uranaktivität betrug und weiter nicht mehr gesteigert werden konnte. Man hatte die chemisch reinen Salze eines neuen Elementes, das Radium genannt wurde, in den Händen.

Das Verhalten des neuentdeckten Stoffes entsprach in jeder Hinsicht dem eines Elementes. Man hat bei ihm ein neues charak-

teristisches Spektrum festgestellt, mit dessen Hilfe man die Gegenwart des Radiums in Mischungen mit Barium ebenso sicher, wenn auch mit kleinerer Empfindlichkeit, feststellen kann wie durch die radioaktive Methode. Später konnten Frau Curie und A. Debierne (1910) durch Elektrolyse einer Lösung von Radiumchlorid das Radiummetall herstellen, das, im besten Einklang mit dem Satze, daß die Radioaktivität eine Atomeigenschaft ist, die volle Aktivität des als Ausgangsmaterial dienenden Salzes aufwies. Auch die Einordnung in das periodische System machte keine Schwierigkeiten. Das Atomgewicht des Radiums beträgt nach O. Hönigschmid 225,97, seine chemischen Eigenschaften sind denen des Bariums sehr weitgehend ähnlich, und damit steht im besten Einklang die Einordnung des Radiums an der vor seiner Entdeckung freien Stelle in der zweiten Gruppe und letzten Horizontalreihe des Systems (vgl. Tabelle 1 und 9). Das neue Element stellt somit das höchste Homologe derjenigen Untergruppe der II. Gruppe vor, zu der das Barium gehört.

Abgesehen von seinen radioaktiven Eigenschaften verhält sich somit das Radium wie jedes andere gewöhnliche Element, und es würde wohl schon vor längerer Zeit mit den gewöhnlichen chemischen Methoden entdeckt worden sein, wenn es nicht in nur so außerordentlich kleinen Konzentrationen in der Natur vorkommen würde. Betragen doch die größten Radiummengen, die in 1 g eines Uranminerals angetroffen werden, noch nicht $^{3}/_{10\,000}$ mg. Die Joachimstaler Pechblende ist das radiumreichste der in größeren, technisch verwertbaren Mengen vorkommenden Erze. Man müßte aber davon etwa 7000 kg aufarbeiten, um selbst bei verlustfreiem Arbeiten 1 g Radium zu erhalten. Dieses spärlichen Vorkommens wegen mußte die Entdeckung des Radiums den radioaktiven Methoden vorbehalten bleiben. Diese sind so empfindlich, daß es ohne Schwierigkeiten gelingt, noch etwa $^{1}/_{100\,000}$ mg Radium mit Hilfe eines Elektroskops nachzuweisen und zu erkennen (5).

b) Die Radiumemanation.

Das neue, so überaus feine analytische Hilfsmittel hat es ermöglicht, noch viele andere Elemente zu entdecken, die in noch viel kleineren Mengen als das Radium vorkommen. Wir wollen

unsere Aufmerksamkeit vor allem einem ganz besonders interessanten Element zuwenden, nämlich der von E. Dorn (1900) aufgefundenen Radiumemanation. Die Radiumemanation, auch Niton genannt, ist ein stark radioaktives Gas, das immer bei Radiumpräparaten zu finden ist und aus Radiumsalzlösungen abgepumpt werden kann, allerdings nur in äußerst geringen Quantitäten. Die größte Menge Radiumemanation, die man von 1 g Radiumelement (Preis vor dem Kriege etwa $^1/_2$ Million Mark) erhalten kann, beträgt nur $^5/_{1000}$ mg. Bei dem Versuch, die chemischen Eigenschaften der Emanation festzustellen, zeigte sich, daß sie ähnlich wie die Edelgase chemisch völlig träge ist, wodurch die Isolierung der Emanation in chemisch reinem Zustande wesentlich erleichtert wurde (E. Rutherford, W. Ramsay u. a.). Man konnte nun zeigen, daß sie ein neues charakteristisches Spektrum besitzt, sich verflüssigen läßt und unter Normaldruck bei — 65^0 siedet. Mit Hilfe einer besonderen Mikrowage konnten W. Gray und Sir William Ramsay sogar das Gewicht eines gemessenen Volumens der Radiumemanation, also auch ihre Dichte ermitteln. Unter der Voraussetzung, daß die Molekel der Emanation wie die aller anderen Edelgase nur aus einem Atom besteht, ergab sich daraus das Atomgewicht der Emanation zu etwa 223, während A. Debierne nach einer eleganten Effusionsmethode den Wert 220 fand. Alle diese Eigenschaften der Emanation ließen keinen Zweifel, daß sie ein neues gasförmiges Element vorstellt, dem im periodischen System die vorher freie Stelle in der letzten Horizontalreihe und der Gruppe der Edelgase zukommt (vgl. Tabelle 1 und 9) (5).

2. Umwandlungsfähigkeit eines Elementes.

Wir haben die zwei radioaktiven Elemente Radium und Radiumemanation etwas näher besprochen, weil sie besonders geeignet sind, um als Beispiel für die Erläuterung einer der fundamentalsten Erkenntnisse, die die Chemie der Radioaktivität verdankt, herangezogen zu werden. Von E. Rutherford und F. Soddy wurde im Jahre 1902 die äußerst kühne Idee ausgesprochen, daß das Wesen der radioaktiven Erscheinungen in der Umwandlung der Elemente besteht. Ohne näher auf die sehr interessante Entwicklung einzugehen, die zu dieser Auffassung geführt

hat, wollen wir gleich den zuerst von Ramsay und Soddy im Jahre 1903 ausgeführten Versuch besprechen, der für den Chemiker den schlagendsten Beweis für die Richtigkeit dieser Idee geliefert hat.

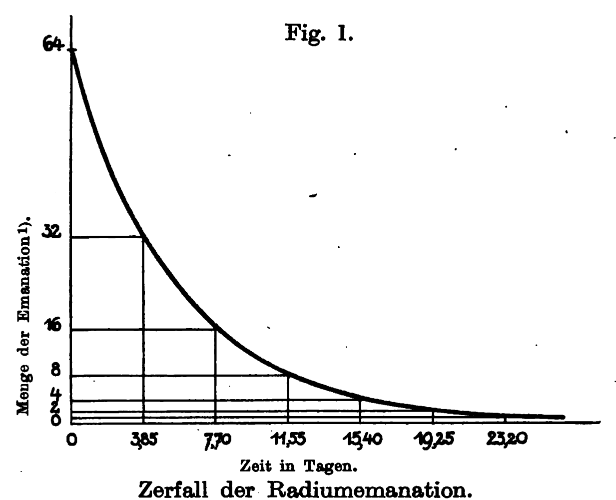
Schließt man eine gewisse Menge Radiumemanation in ein Röhrchen ein, so läßt sich ihr Los durch Messung der von ihr ausgehenden durchdringenden Strahlung, durch Beobachtung des Volumens oder auch spektroskopisch verfolgen. Nun zeigen alle diese drei Methoden, daß die Menge der Emanation mit der Zeit allmählich abnimmt und nach einem Monat nur einen kleinen Bruchteil der ursprünglichen beträgt. Die Emanation verschwindet also, an ihrer Stelle kann man aber spektroskopisch im Röhrchen leicht die Bildung eines anderen Elementes, nämlich des Heliums nachweisen. Aus einem Element ist also ein anderes entstanden.

Das Verschwinden eines Elementes unter Bildung eines anderen steht in direktem Widerspruch mit dem vorher erwähnten Satze von der Erhaltung und Unzerstörbarkeit der Elemente, es ist deshalb klar, daß wir hier eine Tatsache vor uns haben, die die Grundvorstellungen vom Wesen der Elemente berührt. Um ihre Bedeutung ganz würdigen zu können, müssen wir diese Umwandlung eines Elementes (eine sogenannte radioaktive Umwandlung) etwas näher betrachten. Von großer Wichtigkeit ist zunächst die Frage nach dem zeitlichen Verlauf der Umwandlung. Diesen kann man sehr bequem und genau durch öftere elektroskopische Messung der Intensität der von der Emanation ausgesandten Strahlung verfolgen, denn die Intensität der von einem Radioelement emittierten Strahlung ist, wie vielfach festgestellt wurde, seiner Menge proportional. Auf diese Weise hat man gefunden, daß von einer bestimmten Emanationsmenge nach 3,85 Tagen nur die Hälfte zurückbleibt, nach weiteren 3,85 Tagen ein Viertel, dann ein Achtel usw.; jeweils nach 3,85 Tagen wird die Emanationsmenge halbiert (vgl. Fig. 1). Nach einem Monat bleibt weniger als $^1/_2$ Proz., nach 100 Tagen etwas mehr als ein Hundertmillionstel der ursprünglichen Menge zurück. Man nennt das Zeitintervall von 3,85 Tagen die Halbwertszeit der Emanation. Wie man durch einfache Rechnung zeigen kann, entspricht das beschriebene Verhalten dem Gesetze, daß die Umwandlungsgeschwindigkeit, d. h. die Zahl der

pro Zeiteinheit sich umwandelnden Atome, in jedem Augenblick proportional der vorhandenen Zahl der Atome ist, d. h. es ist der in der Zeiteinheit zerfallende Bruchteil unabhängig von der absoluten Zahl der Atome (6).

Die Geschwindigkeit der Umwandlung der Emanation und, wie wir hier gleich hinzufügen können, auch die aller anderen einheitlichen Radioelemente weist einen zeitlichen Verlauf auf, den man aus der Lehre von der Geschwindigkeit chemischer Vorgänge für solche Reaktionen kennt, bei denen nur eine Molekel verändert wird, für die sogenannten monomolekularen Reaktionen. Es entsteht deshalb die Frage, ob man genötigt ist, zu der so revolutionären Auffassung zu greifen, daß man bei der Umwandlung der Emanation mit dem Zerfall eines Elementes zu tun hat oder ob nicht vielleicht die Emanation doch eine chemische Verbindung des Heliums sei, deren Zerfall in ihre Bestandteile wir kennen gelernt haben. Abgesehen davon, daß, wie bereits erwähnt wurde, für die Emanation alle sonstigen Kriterien eines Elementes gelten, unterscheidet sich ihre Umwandlung in mancher Hinsicht prinzipiell von einer chemischen Zersetzung. Die Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion kann man nämlich durch

Fig. 1.



Zerfall der Radiumemanation.

[1]) In willkürlichen Einheiten.

allerlei äußere Faktoren beeinflussen, so durch Änderung des Lösungsmittels, Anwendung von Kontaktsubstanzen, sogenannten Katalysatoren, und vor allem durch Änderung der Temperatur. Durch eine Temperaturerhöhung von 10° läßt sich nach einer bekannten Regel die Geschwindigkeit der allermeisten chemischen Reaktionen auf das Zwei- bis Dreifache steigern. Ganz anders bei den radioaktiven Prozessen: man hat im Falle der Emanation und vieler anderen Radioelemente versucht, ihre Umwandlungsgeschwindigkeit zu beeinflussen, aber selbst Temperaturveränderungen von — 250° bis über 1000° waren nicht imstande, auch nur den geringsten Einfluß auf die Geschwindigkeit der radioaktiven Umwandlungen oder auf die Intensität der Strahlung eines Radioelementes auszuüben. Auch die intensivsten Bestrahlungen mit Röntgen- oder Kathodenstrahlen (7) oder mit den Strahlen der radioaktiven Substanzen selbst sind bis jetzt erfolglos geblieben. Man steht heute den natürlichen[1]) radioaktiven Umwandlungen noch völlig machtlos gegenüber, wir können sie weder beschleunigen noch verzögern. Dieser Umstand ist von so grundsätzlicher Natur, daß man unbedingt die radioaktiven Umwandlungen und die chemischen Prozesse als zwei völlig verschiedene Erscheinungen auseinanderhalten muß. Während die chemischen Reaktionen in Molekeln der Verbindungen vor sich gehen, spielen sich die radioaktiven Prozesse in den Atomen der Elemente ab (8).

3. Die Strahlung radioaktiver Elemente als Begleiterscheinung ihrer Umwandlungen.

Einen tieferen Einblick in das Wesen der radioaktiven Prozesse gewinnt man auch durch nähere Betrachtung des Zusammenhanges, der zwischen der Strahlung der Radioelemente und der soeben erwähnten Heliumbildung besteht.

Man unterscheidet drei Arten von Strahlungen der radioaktiven Substanzen, nämlich die α-, β- und γ-Strahlen. Nur bei den γ-Strahlen handelt es sich um eine Strahlung im engeren Sinne des Wortes, sie stellen nämlich, ähnlich wie die Röntgenstrahlen,

[1]) Über die kürzlich gelungene künstliche Herbeiführung des radioaktiven Zerfalls des Stickstoffs vgl. Kap. XIII.

eine elektromagnetische Wellenbewegung vor, die den Lichtstrahlen an die Seite gestellt werden muß und sich von diesen nur durch eine viel kleinere Wellenlänge unterscheidet. Sie können durch ein elektrisches oder magnetisches Feld nicht abgelenkt werden und ihre Durchdringungsfähigkeit ist so groß, daß sie mehrere Zentimeter Blei zu durchqueren vermögen.

Dagegen sind die α- und β-Strahlen sehr schnell bewegte elektrisch geladene Teilchen, und zwar, wie unter anderem ihr Verhalten im magnetischen oder elektrischen Felde beweist, tragen die β-Teilchen eine negative, die α-Teilchen eine positive Ladung.

Die β-Strahlen sind nichts anderes als negative Elektronen und unterscheiden sich von den in Entladungsröhren entstehenden Kathodenstrahlen nur durch ihre größere Geschwindigkeit, die für die β-Strahlen der verschiedenen Radioelemente zwischen 100000 und nahezu 300000 km/sec liegt. Sonst stellen sie wie die Kathodenstrahlteilchen Atome freier negativer Elektrizität vor, mit der Einheitsladung $e = 1{,}59 \times 10^{-19}$ Coulomb, die die Grenze der Teilbarkeit der Elektrizität vorstellt und das elektrische Elementarquantum genannt wird. Der Größe nach dieselbe Ladung trägt ein einwertiges Atom, z. B. das Wasserstoffatom oder Chloratom, als Ion in Lösung, während mehrwertige Atome, z. B. Eisenatome, ein ganzes Vielfaches dieser Ladung führen. Die Masse eines Elektrons, also auch die des β-Teilchens, beträgt nur $^1/_{1830}$ der Masse eines Wasserstoffatoms (vgl. S. 4). Die β-Strahlen vermögen feste Substanzen bis zu einigen Millimetern Dicke zu durchdringen. Die Dicke von Aluminium, die die Intensität der β- und γ-Strahlen der verschiedenen Radioelemente auf die Hälfte herabsetzt, ist als „Halbwertsdicke" in den Tabellen 2 bis 4 angegeben.

Von besonderem Interesse für uns ist die Natur der α-Teilchen. Ihre Geschwindigkeiten variieren bei den verschiedenen Radioelementen zwischen 15000 und 20000 km/sec. Sie sind von den drei Strahlenarten am wenigsten durchdringend. α-Strahlen einer bestimmten Geschwindigkeit vermögen nur eine scharf begrenzte Schichtdicke einer jeden Substanz zu durchdringen, hinter welcher alle Wirkungen eines parallelen Bündels von α-Strahlen vollkommen aufhören. Diese Schichtdicke, die man als Reichweite der

α-Strahlen bezeichnet, ist im allgemeinen um so kleiner, je dichter das zu durchdringende Material. In einem bestimmten Material ist die Reichweite verschieden schneller α-Teilchen proportional der dritten Potenz ihrer Geschwindigkeit (H. Geiger 1910). Die Reichweiten der bekannten α-Strahlen liegen für Luft von 15^0 und 760 mm zwischen 2,5 und 8,6 cm, während selbst die schnellsten α-Strahlen von 0,06 mm Aluminium vollkommen aufgehalten werden. In der Fig. 2 ist mit Hilfe einer geistreichen von C. T. R. Wilson angegebenen Methode (8) der Weg in Luft der von einem Radiumpräparat ausgehenden α-Teilchen sichtbar gemacht.

Fig. 2.



Sichtbarmachung des Weges von α-Strahlen in Luft nach C. T. R. Wilson.

Die Größe der von den α-Teilchen mitgeführten positiven Ladung konnte auf folgendem Wege ermittelt werden.

Wenn α-Strahlen auf einen Zinksulfidschirm oder Diamant fallen, bringen sie diese Substanzen vorübergehend zum Leuchten. Läßt man eine sehr schwache Strahlung wirken, und beobachtet die leuchtende Substanz unter der Lupe (J. Elster, H. Geitel, W. Crookes 1903), so sieht man zeitlich und räumlich getrennte Lichtblitze, die man Szintillationen nennt. E. Regener, Rutherford und Geiger (1908) bestimmten nun: einerseits die Zahl (n) solcher Lichtblitze, die ein bestimmtes radioaktives Präparat in der Zeiteinheit erzeugt, andererseits die positive elektrische Gesamtladung (E), die von den vom Präparat in der Zeiteinheit ausgesandten α-Strahlen getragen wird. $\frac{E}{n}$ ist dann die Ladung, die einem Lichtblitz (einem α-Teilchen) entspricht und sie ergab

sich genau zu 2 *e* (vgl. S. 15). Ein α-Teilchen trägt also eine doppelt so große Ladung wie ein Wasserstoffion, d. h. die gleiche Ladung wie ein Atom eines zweiwertigen Metalles in Lösung.

Von größtem Interesse war der Nachweis, daß der materielle Träger der positiven Ladung der α-Teilchen das Heliumatom ist. Dieses von Rutherford zunächst auf indirektem Wege erschlossene Resultat konnte von ihm und T. Royds (1909) auch direkt spektroskopisch bestätigt werden. In ein Glasröhrchen mit so dünnen Wänden, daß sie zwar nicht für Heliumgas, wohl aber für die schnell bewegten α-Teilchen durchlässig waren, wurde Radiumemanation eingeführt. Nach einigen Tagen, als die Emanation zum Teil zerfallen war, konnte man in einem das dünnwandige Röhrchen umgebenden weiteren Rohr spektroskopisch Helium nachweisen, woraus direkt folgt, daß die von der Emanation ausgesandten α-Teilchen nach Verlust ihrer positiven Ladung zu Heliumatomen werden. Die Heliumbildung beim Zerfall der Radioelemente steht also im direkten Zusammenhang mit der Emission von α-Strahlen, die wiederum, wie auch die Emission von β- und γ-Strahlen eine Begleiterscheinung der Umwandlungen der Elemente ist (9).

4. Der langsame Zerfall des Radiums.

Die Radiumemanation haben wir als ein verhältnismäßig kurzlebiges Element kennen gelernt, sie muß also ständig von neuem gebildet werden, und da sie immer beim Radium zu finden ist, ist dieses als Muttersubstanz der Emanation anzusehen. Also auch das Radium selbst muß instabil sein und einer Umwandlung unterliegen. Man kann in der Tat leicht feststellen, daß ein von Emanation z. B. durch Auskochen seiner Lösung befreites Radiumsalz ebenso wie die Emanation α-Teilchen aussendet, d. h. Helium erzeugt, und wir kommen somit zu dem Resultat

$$\text{Radium} = \text{Emanation} + \text{Helium}.$$

Nun ist das Atomgewicht des Radiums 226,0, das des Heliums 4,0, wenn also aus einem Atom Radium je ein Atom des Heliums und der Emanation entsteht, müßte das A. G. der Emanation 226,0

— 4,0 = 222,0 sein, und in der Tat sind ja, wie früher erwähnt wurde, experimentell nach zwei verschiedenen, nur angenäherte Werte ergebenden Methoden in genügender Übereinstimmung damit die Werte 220 bzw. 223 gefunden worden.

In scheinbarem Widerspruch mit der Annahme des Zerfalls des Radiums steht die Tatsache, daß selbst nach mehrjähriger Beobachtung weder in der Menge des Radiums, noch in der Intensität seiner Strahlung eine merkliche Abnahme feststellbar war. Dies rührt jedoch daher, daß der Zerfall des Radiums nur ein sehr langsamer ist, d. h. daß das Radium eine verhältnismäßig große Lebensdauer hat. Von den Wegen, die zur Ermittelung der Halbwertszeit des Radiums und anderer langsam zerfallenden Radioelemente führen, sei hier einer erwähnt.

Mit Hilfe der Szintillationsmethode kann man die Zahl der α-Teilchen bestimmen, die von 1 g Radium in der Zeiteinheit emittiert werden. Dividieren wir diese Zahl durch die bekannte Zahl der Atome, die ein 1 g Radium enthält, so erfahren wir, welcher Bruchteil der jeweils vorhandenen Atomzahl in der Zeiteinheit zerfällt, woraus man leicht (6) die Halbwertszeit des Radiums berechnen kann. Diese und andere Methoden ergaben für die Halbwertszeit des Radiums etwa 1600 Jahre (10).

Dieser relativ hohe Wert macht uns auch verständlich, weshalb die Wärmeproduktion des Radiums scheinbar konstant ist, eine Tatsache, die, wie anfangs erwähnt wurde, seinerzeit als Widerspruch gegen das Gesetz der Erhaltung der Energie gegolten hat. Diese Wärmeproduktion ist nämlich eine Begleiterscheinung des radioaktiven Zerfalls, sie stellt sozusagen seine Reaktionswärme vor und ist sehr annähernd gleich der kinetischen Energie der Radiumstrahlen. Sie nimmt also in Wirklichkeit in demselben Maße ab, wie die Menge des Radiums selbst, also zu langsam, als daß die Abnahme in kurzen Zeitabschnitten sich bemerkbar machen könnte. Da man aber die Zerfallsgeschwindigkeit des Radiums kennt, so kann man aus der stündlichen Wärmeentwicklung leicht berechnen, wieviel Wärme frei wird, wenn ein Grammatom (226 g) Radium praktisch vollständig in Emanation zerfällt, ein Vorgang, der viele Tausende von Jahren dauert. Das Resultat ist ein höchst interessantes, nämlich über 10^{11} (hunderttausend

Millionen) Grammkalorien, während die Wärmeentwicklung einer der energischsten chemischen Reaktionen, die wir kennen, nämlich der Verbrennung des Wasserstoffes zu Wasser, pro Grammolekül (18 g Wasser) nur 68000 Kalorien, also nicht einmal ein Millionstel des obigen Wertes beträgt. Die enorme Wärmeentwicklung ist neben der Unbeeinflußbarkeit der radioaktiven Vorgänge ein zweiter wesentlicher Unterschied, der diese von den chemischen Reaktionen trennt (11).

5. Die Umwandlungsgeschwindigkeit als Charakteristikum eines Radioelementes; aktiver Niederschlag der Radiumemanation.

Der Umstand, daß die Radioaktivität eine Atomeigenschaft ist, und daß die radioaktiven Vorgänge durch keinen äußeren Faktor beeinflußbar sind, macht die Geschwindigkeit der Umwandlung eines Radioelementes zu einer für ihn besonders charakteristischen Eigenschaft. Nun haben Rutherford und Soddy in ihrer Theorie das Postulat aufgestellt, daß der zeitliche Ablauf der Umwandlung eines einheitlichen Radioelementes dem einfachen sogenannten logarithmischen Gesetz (6) gehorcht, das wir früher bei der Besprechung der Radiumemanation erwähnt haben: danach zerfällt von einem bestimmten Element pro Zeiteinheit stets derselbe Bruchteil der vorhandenen Zahl der Atome und es besitzt jedes Radioelement eine bestimmte charakteristische Halbwertszeit, die von seiner Menge unabhängig ist. Aus diesem Postulat ergaben sich folgende Konsequenzen. Jedesmal, wenn man eine radioaktive Strahlung mit einer vorher unbekannten Halbwertszeit abfallen sah, mußte geschlossen werden, daß man ein neues Radioelement vor sich hatte. Die Beobachtung eines komplizierteren Zeitgesetzes wies hingegen auf das Vorhandensein von mehr als einem Element hin. Diese Leitsätze erwiesen sich als außerordentlich fruchtbar und führten zur Entdeckung einer großen Zahl neuer Elemente.

Als Beispiel sei etwas näher nur das weitere Schicksal der Radiumemanation verfolgt. Das Helium ist nämlich nicht ihr einziges Umwandlungsprodukt. Vielmehr findet man auf den

Wänden eines Emanationsröhrchens, sowie auf jedem in Emanationsatmosphäre hineingebrachten Gegenstand, z. B. einem Platindraht, einen unsichtbaren festen radioaktiven Rückstand, den sogenannten aktiven Niederschlag, dessen Aktivität nach einem ziemlich komplizierten Zeitgesetz abfällt. Die nähere Analyse ergab, daß man in ihm die Existenz von mindestens drei Radioelementen annehmen muß. Direkt aus der Emanation entsteht das Radium A (Ra A), das weiter mit der Halbwertszeit von 3 Minuten unter Aussendung von α-Strahlen zerfällt und dabei in das β- und γ-Strahlen emittierende Radium B (RaB) umgewandelt wird. Letzteres hat eine Halbwertszeit von 26,8 Minuten und ergibt bei seiner Umwandlung das Radium C (Ra C), das eine Halbwertszeit von 19,5 Minuten aufweist und α-, β- und γ-Strahlen aussendet.

Es ist verständlich, daß es den Chemikern zunächst etwas merkwürdig zu Mute war, als Rutherford hier aus dem radioaktiven Verhalten eines unsichtbaren Beschlages die Existenz von drei neuen Elementen folgerte. Und doch war es möglich, auch mit anderen Methoden nachzuweisen, daß man einen aus mehreren Bestandteilen zusammengesetzten materiellen Beschlag vor sich hatte. Der aktive Niederschlag läßt sich von einem aus der Emanationsatmosphäre entfernten Platindraht wie ein Metall durch Säure ablösen. Taucht man nach einer halben Stunde, in welcher Zeit das kurzlebige Radium A fast vollständig zerfällt, in eine solche Lösung ein Nickelblech ein, so findet man auf dem Nickel eine Aktivität, die von α-, β- und γ-Strahlen herrührt und nach einem einfachen logarithmischen Zeitgesetz mit der konstanten Halbwertszeit 19,5 Minuten zerfällt. Man hat also das reine Ra C abgeschieden. Fügt man hingegen zu einer Lösung des aktiven Niederschlages ein Bleisalz hinzu und fällt das Blei als Sulfat aus, so bleibt das Ra C in Lösung, während man im Niederschlag zunächst hauptsächlich nur das Radium B findet, aus dem dann allmählich wieder das Ra C entsteht. Auch durch Erhitzen des festen Beschlages oder durch Elektrolyse der Lösung lassen sich die drei Produkte voneinander trennen; sie haben also nicht nur verschiedene radioaktive Eigenschaften, sondern zeigen auch Unterschiede im chemischen und physikalischen Verhalten, wie man es ja von verschiedenen Elementen zu erwarten hatte.

Wir haben also eine ganze Reihe von Radioelementen kennen gelernt, die zueinander in genetischer Beziehung stehen:

Ra ⟶ Ra·Em ⟶ Ra A ⟶ Ra B ⟶ Ra C.

Durch ähnliche Methoden wie die bisher besprochenen hat man nun viele andere Radioelemente entdeckt und ihre genetischen Beziehungen untersucht, und heute kennt man nicht weniger als 39 Radioelemente. Ausgenommen das Kalium und Rubidium, die auch als radioaktiv erwiesen wurden, lassen sie sich alle in drei Umwandlungsreihen oder Familien einordnen. Es sind dies die Uran-Radiumreihe, die Actinium- und die Thoriumreihe (12).

6. Die drei radioaktiven Reihen[1]).

Die Uran-Radiumreihe beginnt mit dem bekannten Element Uran, dem Hauptbestandteil der Uranpechblende, und führt nach einigen Umwandlungen, die wir später noch näher besprechen werden, über das Element Ionium zum Radium. Das von B. Boltwood (1907) u. a. entdeckte Ionium läßt sich aus Uranmineralien mit Thorium abscheiden, es ist die direkte Muttersubstanz des Radiums, dessen allmähliche Bildung in einem Ioniumpräparat leicht beobachtet werden kann. Daß aus Uran, wenn auch nicht direkt, in der Tat Radium entsteht, konnte ebenfalls gezeigt werden (Soddy 1915).

Die genetischen Beziehungen zwischen Uran und Radium erklären es, weshalb das Radium stets in Uranmineralien vorzufinden ist. Denn wenn auch das Radium für sich allein genommen infolge seiner Umwandlung mit der Halbwertszeit von 1600 Jahren in einigen 10000 Jahren praktisch vollständig verschwinden muß, wird es in den seit Millionen von Jahren in der Erdkruste ruhenden Mineralien immer wieder aus Uran nachgebildet. Dabei stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, bei welchem in der Zeiteinheit ebensoviel Radium zerfällt wie entsteht. Es ist leicht durch eine einfache Rechnung zu zeigen, daß bei diesem sogenannten

---

[1]) Vgl. Tabellen 2 bis 5. In diesen wurde die im Jahre 1918 auf Vorschlag von St. Meyer und E. v. Schweidler vereinbarte (13) Nomenklatur der Radioelemente benutzt.

Tabelle 2. **Uran-Radiumreihe.**

Name des Elementes	Symbol	Halbwertszeit	Strahlung	Reichweite der α-Strahlen[1]) in cm	Halbwertsdicke in cm Aluminium		Chemischer Typus	Atomgewicht
					β-Strahlen	γ-Strahlen		
Uran I. . .	U_I	$5 \cdot 10^9$ a	α	2,50	—	—	U	<u>238,2</u>
Uran X_1 . .	UX_1	24 d	βγ	—	$1{,}36 \cdot 10^{-3}$	$2{,}89 \cdot 10^{-2}$ 0,99	Th	234
Uran X_2 . .	UX_2	1,15 m	βγ	—	$4{,}81 \cdot 10^{-2}$	4,95	Pa	234
Uran II . .	U_{II}	$(2 \cdot 10^6$ a)	α	2,90	—	—	U	234
Uran Y .	UY	25,5 h	β	—	$2{,}3 \cdot 10^{-3}$	—	Th	(?)
Ionium . .	Io	10^5 a	α	3,11	—	—	Th	230
Radium . .	Ra	1600 a	αβ	3,30	$2{,}2 \cdot 10^{-3}$	—	Ra	<u>225,97</u>
Radium-emanation	RaEm	3,85 d	α	4,16	—	—	Em	222
Radium A .	RaA	3,0 m	α	4,75	—	—	Po	218
Radium B .	RaB	26,8 m	βγ	—	$5{,}3 \cdot 10^{-2}$ $8{,}6 \cdot 10^{-3}$ $8 \cdot 10^{-4}$	$3{,}0 \cdot 10^{-3}$ $1{,}73 \cdot 10^{-2}$ 1,36	Pb	214
Radium C .	RaC	19,5 m	(α)βγ	(?)	$5{,}3 \cdot 10^{-2}$ $1{,}31 \cdot 10^{-2}$	6,03	Bi	214
Radium C′ .	RaC′	$(10^{-6}$ s)	α	6,94	—	—	(Po)	214
Radium C″	RaC″	1,4 m	β	—	wie bei RaC	—	(Tl)	210
Radium D .	RaD	16 a	βγ	—	$1{,}26 \cdot 10^{-4}$	0,015 0,70	Pb	210
Radium E .	RaE	5,0 d	βγ	—	$1{,}61 \cdot 10^{-2}$	wie bei RaD	Bi	210
Radium F . (Polonium)	RaF(Po)	136 d	α	3,85	—	—	Po	210
Radium G . (Radiumblei)	RaG($\overset{206,0}{Pb}$)	—	—	—	—	—	Pb	<u>206,0</u>

(Umwandlungsfolge laut Pfeilen: U_I → UX_1 → UX_2 → U_{II} → Io → Ra → RaEm → RaA → RaB → RaC → RaC′ → RaD → RaE → RaF(Po) → RaG; RaC → RaC″ → RaD; U_{II} ?→ UY; U_I ?→ UY.)

[1]) Zu den Tabellen 2, 3 und 4:
Die Reichweite der α-Strahlen gilt für Luft von 15⁰ und 760 mm.
a = Jahr, d = Tag, h = Stunde, m = Minute, s = Sekunde.
Die unterstrichenen Werte der Atomgewichte sind direkt experimentell ermittelt, die eingeklammerten der Elemente der Actiniumreihe sind hypothetisch, die übrigen auf Grund der genetischen Beziehungen berechnet.

Tabelle 3.

Actiniumreihe.

Name des Elementes	Symbol	Halbwertszeit	Strahlung	Reichweite der α-Strahlen in cm	Halbwertsdicke in cm Aluminium		Chemischer Typus	Atomgewicht
					β-Strahlen	γ-Strahlen		
Protactinium	Pa ↓	(10^4—10^5 a)	α	3,49	—	—	Pa	(etwa 230)
Actinium	Ac ↓	etwa 20 a	(β)	—	—	—	Ac	(„ 226)
Radioactinium	RdAc ↓	19 d	αβγ	4,2	$4 . 10^{-3}$	$2{,}8 . 10^{-2}$; 3,5	Th	(„ 226)
Actinium X	AcX ↓	11,5 d	α	4,3	—	—	Ra	(„ 222)
Actiniumemanation. . .	AcEm ↓	3,92 s	α	5,6	—	—	Em	(„ 218)
Actinium A	AcA ↓	0,002 s	α	6,3	—	—	(Po)	(„ 214)
Actinium B	AcB ↓	36,1 m	βγ	—	sehr klein	$5{,}77 . 10^{-3}$; $2{,}23 . 10^{-2}$; 1,54	Pb	(„ 210)
Actinium C	AcC (→ AcC′, → AcC″)	2,15 m	α(β)	5,2	—	—	Bi	(„ 210)
Actinium C′	AcC′ (⇢ AcD)	(0,005 s)	α	6,4	—	—	(Po)	(„ 210)
Actinium C″.	AcC″ ↓	4,71 m	βγ	—	$2{,}4 . 10^{-2}$	3,5	Tl	(„ 206)
Actinium D . . . . (Actiniumblei)	AcD	—	—	—	—	—	Pb	(„ 206)

Tabelle 4. **Thoriumreihe.**

Name des Elementes	Symbol	Halbwertszeit	Strahlung	Reichweite der α-Strahlen in cm	Halbwertsdicke in cm Aluminium		Chemischer Typus	Atomgewicht
					β-Strahlen	γ-Strahlen		
Thorium	Th	$1,5 \cdot 10^{10}$ a	α	2,72	—	—	Th	232,15
Mesothorium 1	→ $MsTh_1$	6,7 a	(β)	—	—	—	Ra	228
Mesothorium 2	→ $MsTh_2$	6,2 h	βγ	—	$3,5 \cdot 10^{-2}$ bis $1,8 \cdot 10^{-2}$	0,027; 5,98	Ac	228
Radiothorium	→ Rd Th	1,90 a	αβ	3,87	—	—	Th	228
Thorium X	→ Th X	3,64 d	α	4,30	—	—	Ra	224
Thoriumemanation	→ Th Em	54,5 s	α	5,00	—	—	Em	220
Thorium A	→ Th A	0,14 s	α	5,70	—	—	(Po)	216
Thorium B	→ Th B	10,6 h	βγ	—	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$; $2,2 \cdot 10^{-2}$; 1,9	Pb	212
Thorium C	→ Th C (→ Th C″)	60,8 m	αβ	4,80	$4,8 \cdot 10^{-2}$	—	Bi	212
Thorium C′	→ Th C′	$(10^{-11}$ s)	α	8,60	—	—	(Po)	212
Thorium C″	Th C″	3,1 m	βγ	—	$3,2 \cdot 10^{-2}$	7,22	Tl	208
Thorium D (Thoriumblei)	→ Th D (208,0 Pb)	—	—	—	—	—	Pb	208,0

radioaktiven Gleichgewicht die Zahl der vorhandenen Atome von Uran und Radium in demselben Verhältnis zueinander stehen muß wie deren Halbwertszeiten. Es steht in bester Übereinstimmung mit dieser Forderung, daß in den verschiedensten Mineralien dieses Verhältnis stets den gleichen Wert hat, nämlich U : Ra $= 2{,}85 \times 10^6$, woraus sich die Halbwertszeit des Urans zu $1600 \times 2{,}85 \times 10^6 = 5 \times 10^9$ Jahren ergibt. Man erhielt denselben Wert für die Halbwertszeit des Urans durch Bestimmung der von 1 g Uran pro Zeiteinheit ausgesandten Zahl der α-Teilchen, eine Methode, die schon beim Radium erwähnt wurde.

Die dem Radium folgenden Umwandlungsprodukte der Uran-Radiumreihe haben wir bis zum Radium C schon früher kennen gelernt. Nach einigen weiteren Umwandlungen gelangt die Reihe zum Radium F, auch Polonium genannt, das seinerzeit ein besonderes Interesse beanspruchte, weil es das erste von Frau Curie in der Pechblende entdeckte Radioelement war. Die Halbwertszeit des Radiums F beträgt 136 Tage.

Die Kurzlebigkeit der allermeisten Abkömmlinge des Radiums erklärt es, weshalb man diese Elemente nur in winzigen Mengen erhalten kann. Denn aus dem über das Mengenverhältnis Ra : U in Mineralien Gesagten folgt, daß man von 1 g Radium im Gleichgewicht mit der Emanation und dem kurzlebigen aktiven Niederschlag nur etwa $^3/_{100000}$ mg Radium B erhalten kann. Kein Wunder, daß dieses Element nur als unsichtbarer Beschlag zum Vorschein kommt. Dank seiner radioaktiven Eigenschaften kann man aber selbst 10^{-16} g Radium B nachweisen und erkennen.

Das Polonium hinterläßt nach seiner Umwandlung keinen radioaktiv nachweisbaren Rückstand mehr, so daß man annehmen muß, daß das Umwandlungsprodukt des Radiums F — das Radium G — ein sehr beständiges Element ist. Man nennt es deshalb das Endprodukt der Uran-Radiumreihe, mit ihm werden wir uns noch eingehend zu beschäftigen haben.

Die Umwandlungen der Thoriumreihe führen zunächst vom Thorium, dem Hauptbestandteile der Gasglühstrümpfe, zu den in der Medizin gut bekannten Elementen Mesothorium, Radiothorium und Thorium X, welch letzteres seinerseits eine der Radiumemanation sehr ähnliche, aber noch viel kurzlebigere Emana-

tion liefert. Nach einer Reihe von weiteren Umwandlungen, die denen der Radiumreihe weitgehend entsprechen, bricht die Thoriumreihe ab. Auf die stabilen Produkte, zu denen sie führt, werden wir noch zurückkommen.

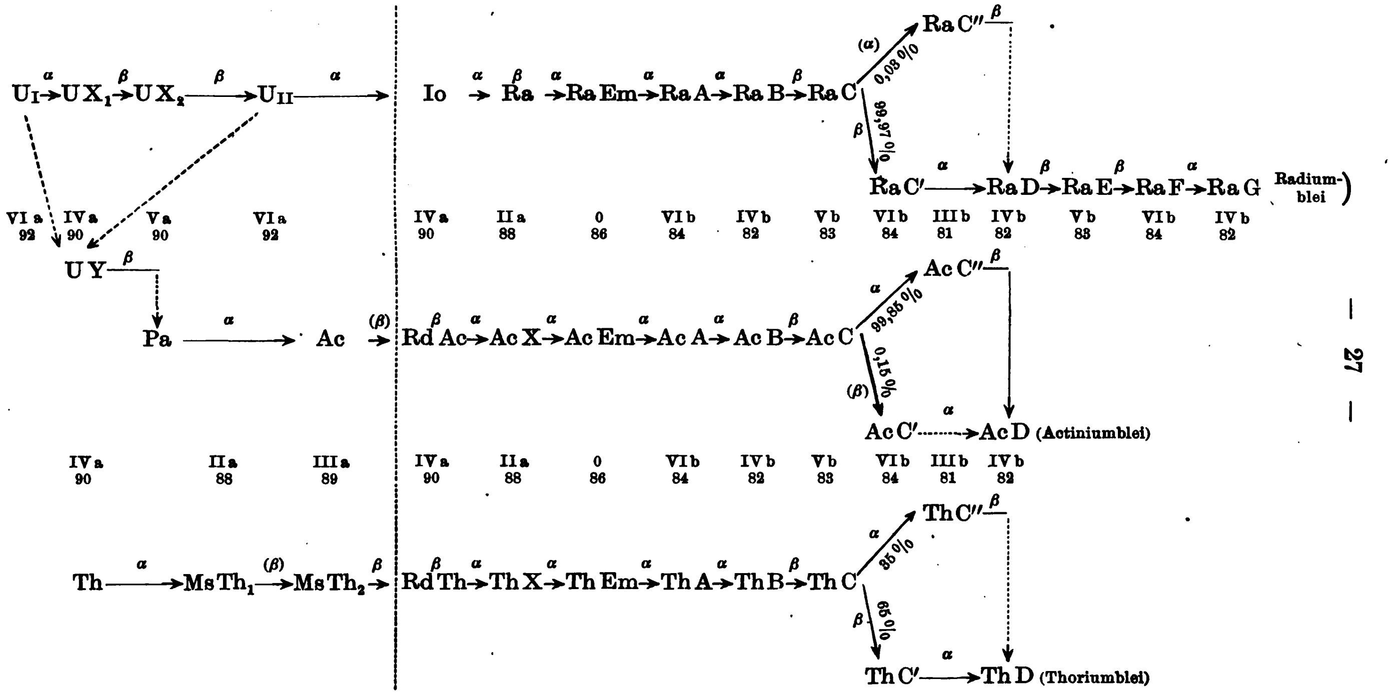
Das Actinium, dem die dritte der bekannten radioaktiven Reihen ihren Namen verdankt, konnte bis jetzt in chemisch reinem Zustande nicht erhalten werden, da es wegen seiner verhältnismäßig kleinen Lebensdauer von etwa 20 Jahren nur in winzigen Mengen vorkommt. Es wurde von A. Debierne und namentlich von F. Giesel (1899 bis 1900) aus der Pechblende mit den Elementen der seltenen Erden (Lanthan) abgeschieden und kann bis jetzt nur auf Grund seiner radioaktiven Eigenschaft charakterisiert werden. Die Umwandlungen der Actiniumreihe sind denen der anderen Reihen ganz analog.

Alle diese vielen Umwandlungen lassen sich in zwei Gruppen einteilen (Tabelle 5). Die eine Art haben wir schon kennen gelernt: sie beruht auf der Spaltung des Atoms in das nächste Atom der Reihe und ein Heliumatom, das in Form eines α-Teilchens ausgeschleudert wird. Man nennt diese Umwandlungen α-Strahlenumwandlungen oder α-Umwandlungen und die Elemente, die ihnen unterliegen, α-Strahler. Die andere Art von Umwandlungen sind die sogenannten β-Strahlenumwandlungen oder β-Umwandlungen; bei ihnen werden die β-Strahlen, d. h. negative Elektronen, abgegeben. Die Buchstaben α und β über den Pfeilen, die die Umwandlungen der betreffenden Elemente in der Tabelle 5 andeuten, zeigen die Art der Umwandlung an [1]).

Bei den Umwandlungen des Actiniums und des Mesothoriums 1 konnten keine Strahlen nachgewiesen werden. Es ist aber möglich (vgl. S. 79), daß hier sehr weiche (wenig durchdringende) β-Strahlen vorliegen, die aufzufinden Schwierigkeiten bereitet. Wie auch aus Tabelle 5 zu ersehen ist, scheinen in drei Fällen, nämlich beim Radium, Radiothorium und Radioactinium, beide Arten von Strahlen emittiert zu werden. Es ist aber möglich, daß die Umwandlungen der betreffenden Elemente von komplizierterer Natur sind als die bisher besprochenen. Wir kennen nämlich einige

[1]) Die meisten β-Strahler emittierten außer den β- auch noch γ-Strahlen, wie aus den Tabellen 2 bis 4 hervorgeht.

Tabelle 5. Die drei radioaktiven Reihen.



Die römischen Zahlen geben die Gruppen des periodischen Systems, die arabischen die Ordnungszahlen an. Punktierte Pfeile deuten hypothetische Zusammenhänge an.

Fälle, wo ein Element zwei verschiedenen Umwandlungen unterliegt. Das sieht man vor allem beim Radium C, Actinium C und Thorium C. Ein Teil der Atome dieser Elemente unterliegt α-Strahlenumwandlungen, wobei die β-Strahler Radium C'', Actinium C'' und Thorium C'' entstehen; die übrigen Atome erleiden β-Strahlenumwandlungen, welche zu den α-Strahlern RaC', AcC' und ThC' führen. Die radioaktiven Reihen weisen also bei diesen Elementen eine Verzweigung auf. Sehr interessant sind die bei diesen Verzweigungen auftretenden quantitativen Verhältnisse. Beim Thorium C erleiden 35 Proz. aller Atome die α-Umwandlung, die übrigen 65 Proz. die β-Umwandlung. Beim Radium C wandeln sich beinahe alle Atome mit Aussendung von β-Strahlen um und nur etwa 3 von 10 000 unterliegen einer α-Umwandlung. Beim Actinium C hingegen erleiden die allermeisten Atome die α-Umwandlung und nur etwa 0,15 Proz. eine β-Umwandlung.

Das von G. Antonoff gefundene Element Uran Y stellt auch ein Abzweigungsprodukt am Anfange der Uranreihe vor. Doch ist es noch nicht ganz sicher (vgl. S. 45), ob es aus Uran I oder Uran II gebildet wird.

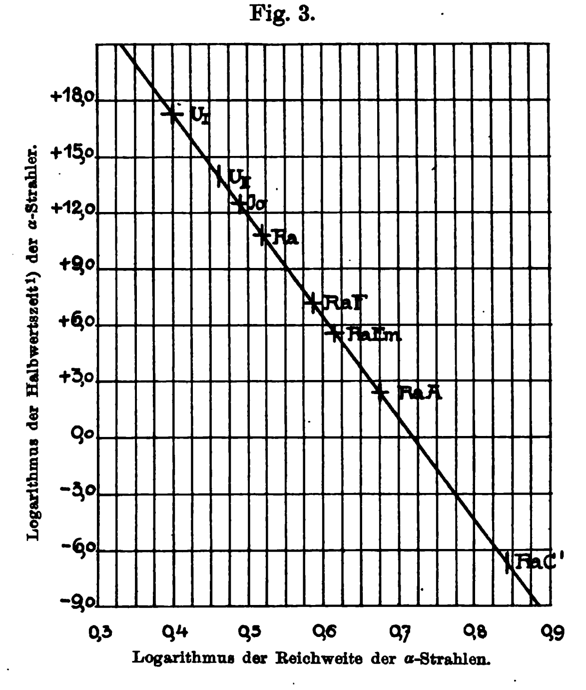
Es sei an dieser Stelle schon erwähnt, daß die Actiniumreihe ebenfalls eine Abzweigung von der Uranreihe vorstellt, worüber weiter unten noch Näheres mitgeteilt wird.

Bevor wir die Besprechung der radioaktiven Eigenschaften der Radioelemente abschließen, sei noch darauf hingewiesen, daß ihre Halbwertszeiten zwischen den so enorm voneinander entfernten Grenzen wie 10^{10} Jahre beim Thorium und 10^{-11} Sekunden beim Thorium C'' liegen. Wie man die Halbwertszeit sehr langlebiger Elemente bestimmt, wurde schon am Beispiele des Radiums und Urans erläutert, nicht minder interessant ist es zu sehen, wie man zur Ermittelung einer ganz kleinen Lebensdauer gelangt.

Durch direkte experimentelle Methoden ist es gelungen, Halbwertszeiten bis zu 0,002 Sekunden hinab zu messen. Noch weiter, allerdings nur auf indirektem Wege, gelangt man mit Hilfe einer bemerkenswerten, von H. Geiger (1911) entdeckten, quantitativen Beziehung zwischen der Halbwertszeit der Elemente und der Reichweite der von ihnen emittierten α-Strahlen. Wie man schon qualitativ aus den Tabellen 2 bis 4 ersehen kann, steigt

innerhalb jeder radioaktiven Familie die Reichweite mit fallender Lebensdauer. Trägt man, wie in Fig. 3 für die Uran-Radiumreihe geschehen ist, die Logarithmen der Reichweiten gegen die Logarithmen der Halbwertszeiten in ein Diagramm ein, so liegen die für die Glieder einer Familie erhaltenen Kreuze auf einer geraden Linie. Aus ihr kann man z. B. entnehmen, daß das Uran II, dessen α-Strahlen eine Reichweite von 2,90 cm aufweisen, die auf anderem Wege bis jetzt nicht bestimmbare Halbwertszeit von

Fig. 3.



2×10^6 Jahren besitzen muß, um der Beziehung zu entsprechen. Nun weisen die α-Strahlen der Elemente RaC′, ThC′, AcC′ so große Reichweiten auf, daß man der Geigerschen Beziehung nur dann gerecht werden kann, wenn man annimmt, daß sie von sehr kurzlebigen Elementen mit den Halbwertszeiten von etwa 10^{-6}, 0,005 und 10^{-11} Sekunden emittiert werden. Natürlich kann von einer Isolierung so kurzlebiger Elemente keine Rede sein (14).

[1]) Ausgedrückt in Sekunden.

III. Chemie der Radioelemente.

Wir haben gesehen, daß es mit Hilfe radioaktiver Methoden gelungen ist, etwa 35 neue Elemente zu entdecken. Schon frühzeitig hat man sich die Frage vorgelegt, wie denn das Verhältnis dieser vielen Radioelemente zu den übrigen gewöhnlichen Elementen und namentlich zum periodischen System ist, das immer den Anspruch erhob, alle bekannten Elemente zu umfassen und für jedes neue einen eigenen Platz bereitzuhalten. Um verständlich zu machen, weshalb die Beantwortung dieser Frage zunächst große Schwierigkeiten bereitet hat, wollen wir vor allem über die Atomgewichte der Radioelemente berichten, denn auf Grund dieser Eigenschaft wurden ja gewöhnlich die Elemente in das System eingereiht.

1. Atomgewichte der Radioelemente.

Die allermeisten Radioelemente sind, wie gezeigt wurde, wegen ihrer Kurzlebigkeit nur in so außerordentlich kleinen Mengen zugänglich, daß an eine direkte Atomgewichtsbestimmung wenigstens mit den gewöhnlichen chemischen Methoden nicht zu denken ist. In den zwischen den Radioelementen bestehenden genetischen Beziehungen besitzen wir aber doch einen Weg, um ihr A. G. zu ermitteln. Bei α-Strahlenumwandlungen wird ja ein Heliumatom abgespalten, so daß zu erwarten ist, daß das Atomgewicht des Umwandlungsproduktes um das A. G. des Heliums (4,00) kleiner ist als das A. G. des sich umwandelnden Elementes. Andererseits findet bei β-Strahlenumwandlungen nur der Verlust eines Elektrons statt, dessen Masse $^1/_{1830}$ der des Wasserstoffatoms ist. Aber selbst diese kleine Atomgewichtsveränderung findet bei β-Umwandlungen nicht statt. Denn nach Abgabe eines negativ geladenen β-Teilchens bleibt das entstehende Atom positiv geladen zurück und wird von außen ein negatives Elektron wieder aufnehmen, um neutral zu werden. Nach β-Umwandlungen ist also das Atomgewicht des Umwandlungsproduktes gleich dem seiner direkten Muttersubstanz.

Zu berücksichtigen ist noch die Änderung der Masse, die nach dem Relativitätsprinzip wegen der Änderung des Energiegehaltes

der Atome bei radioaktiven Umwandlungen zu erwarten ist. Wie R. Swinne berechnet hat, ist diese Änderung indessen so klein, daß wir sie nur bei sehr genauem Vergleich der Atomgewichte weit auseinander liegender Glieder einer radioaktiven Reihe zu berücksichtigen haben werden.

Auf obige Weise kann man nun das A. G. aller Radioelemente berechnen, die der Uran-Radium- und der Thoriumreihe angehören, weil ja sowohl das A. G. des Urans (238,2) wie das des Thors (232,12) bekannt ist[1]) und auch alle Umwandlungen, die in diesen zwei Reihen vorkommen, genau studiert sind. Daß diese Methode mit beträchtlicher Annäherung richtige Resultate ergibt, folgt daraus, daß man so für das A. G. des Radiums 238,2 — 12,0 = 226,2 bekommt, also einen Wert, der in der Tat ziemlich nahe mit dem wirklichen, dank den schönen Untersuchungen von O. Hönigschmid mit großer Genauigkeit bekannten A. G. des Radiums (225,97) übereinstimmt. Für die kleine bestehende Diskrepanz fehlt allerdings noch eine befriedigende Erklärung.

Das A. G. des Actiniums ist noch nicht sicher bekannt. Doch folgt aus später noch zu besprechenden Beziehungen, daß es in der Nähe von 226 liegen dürfte, so daß man auch die Atomgewichte aller Produkte der Actiniumreihe annähernd berechnen kann. Auf diese Weise ergibt es sich (vgl. Tabellen 2 bis 4), daß die Atomgewichte aller dieser Elemente, etwa 40 an der Zahl, zwischen den Werten 238 und 206 liegen (15). Ein Blick auf die Tabelle des periodischen Systems lehrt, daß in diesem Atomgewichtsintervall die Zahl der im System verfügbaren Plätze so klein ist, daß es nicht möglich ist, jedem der neuen Elemente eine eigene Stelle zuzuweisen. Der Versuch, Elemente, die durch β-Umwandlungen miteinander verknüpft sind und deshalb das gleiche A. G. besitzen, eine gemeinsame Stelle im System zuzuweisen, ergab auch keine Lösung des Problems.

Eine solche wurde erst gefunden, als man das chemische Verhalten der Radioelemente in den Vordergrund der Betrachtungen stellte.

[1]) Diese Werte sind den Bestimmungen von O. Hönigschmid entnommen.

2. Die chemischen Eigenschaften der Radioelemente.

Man darf sich nicht wundern, wenn es erst verhältnismäßig spät gelungen ist, zu voller Klarheit über das chemische Verhalten der Radioelemente zu gelangen. Die allermeisten dieser Stoffe können ja wegen ihrer kurzen Lebensdauer nicht in wägbaren Mengen in reinem Zustande erhalten werden, so daß man sich bei der Untersuchung ihrer chemischen Eigenschaften auf das Studium ihres Verhaltens bei Reaktionen anderer in größeren Mengen beigemischter Elemente beschränken muß. Bei der Deutung der auf diesem Wege ermittelten Tatsachen stieß man jedoch auf das schwerwiegende Bedenken, ob es erlaubt ist, aus dem Verhalten der Radioelemente, das sie in winzigen Quantitäten zeigen, Rückschlüsse auf ihre chemischen Eigenschaften zu ziehen, die sie in wägbaren Mengen aufweisen würden. Diesbezügliche Zweifel schwanden erst, als man einer zuerst im Jahre 1907 von H. Mc Coy und W. Ross beim Radiothorium und Thorium beobachteten prinzipiell neuen Erscheinung die volle Aufmerksamkeit schenkte, nämlich der Unmöglichkeit, manche radioaktiven Elemente voneinander oder von gewöhnlichen Elementen auf chemischem Wege zu trennen.

Um die Bedeutung dieser Erscheinung würdigen zu können, muß man sich vergegenwärtigen, daß der gewöhnliche Weg zur Erkennung neuer Elemente in deren Isolierung aus Gemischen mit anderen Elementen mit Hilfe einer der eingangs erwähnten chemischen oder physikalisch-chemischen Methoden bestand. Ein außerordentlich wertvolles Mittel zur Auffindung neuer Elemente hat bekanntlich die Spektroskopie geliefert. Jedesmal, wenn man ein neues Linienspektrum beobachtete, gelang es auch, durch die genannten Methoden seinen Träger als ein neues Element zu isolieren. Nun kam das neue Hilfsmittel hinzu — die Radioaktivität, und wir besprachen ja schon ausführlich die mit ihrer Hilfe entdeckten und in reinem Zustand isolierten Elemente Radium und Radiumemanation. Ebenso wurde die Aktivität des aus der Pechblende isolierten Wismuts bzw. Lanthans den neuen Elementen Polonium und Actinium zugeschrieben, und wenn es auch wegen ihres spär-

lichen Vorkommens noch nicht gelungen ist, sie in reinem Zustande zu isolieren, konnte gezeigt werden, daß sie von allen bekannten Elementen chemisch trennbar sind, und daß dem Polonium (nach W. Marckwald, 1902) die früher freie Stelle eines höheren Homologen des Tellurs, dem Actinium die eines höheren Homologen des Lanthans (vgl. Tabelle 9) zukommt. In diesen Fällen kommen also die neuen radioaktiven Eigenschaften auch chemisch neuen Individuen zu.

Es zeigte sich aber, daß dieses Verhalten durchaus nicht für alle Radioelemente zutrifft. So ist z. B. das Blei, das man aus Uranmineralien abscheidet, immer aktiv, wobei die nähere radioaktive Untersuchung bewies, daß für diese Aktivität das Radium D (mit seinen Umwandlungsprodukten Radium E und Radium F) verantwortlich ist, ein Element, dessen Halbwertszeit 16 Jahre beträgt. Man versuchte, das Ra D vom Blei der Pechblende zu trennen, aber alle Bemühungen waren erfolglos: es gibt keine Reaktion, durch die sich Ra D vom Blei unterscheiden würde, und auch die ausgedehntesten, besonders von F. Paneth und G. v. Hevesy (1913) ausgeführten Versuche, durch fraktionierte Fällung, Oxydation, Kristallisation oder Verflüchtigung eine Anreicherung von Ra D aus dem Gemisch mit Blei zu erreichen, führten zu völlig negativen Resultaten. Nach allen Operationen bleibt das Mengenverhältnis des Ra D zum Blei unverändert, die Aktivität des Ra D pro Gewichtseinheit des Bleies ließ sich selbst durch 1000 Kristallisationen (Th. W. Richards und N. F. Hall, 1917) (16) nicht merklich ändern. Diese zwei Elemente sind also mit chemischen Methoden untrennbar, und doch stellt ja natürlich das Radium D ein anderes Element als Blei vor: man kann es frei von Blei erhalten durch Zersetzung von Radiumemanation, und wir können es immer durch seine radioaktiven Eigenschaften leicht erkennen und vom Blei unterscheiden.

Ebenso verhält es sich mit dem Thorium, das aus Uranpechblende abgeschieden wird. Es ist etwa 100000 mal aktiver als das gewöhnliche Thorium; der Träger dieser Aktivität ist das vorher besprochene Ionium, die Muttersubstanz des Radiums; es gelang aber auch hier nicht, das Ionium in einem Gemisch mit Thorium anzureichern. Das von O. Hahn entdeckte technisch wichtige

Mesothorium 1 und Radium stellen ebenfalls zwei Elemente vor, die sich zwar leicht durch ihre radioaktiven Eigenschaften unterscheiden lassen, indessen durch chemische Methoden völlig untrennbar zu sein scheinen, wie dies W. Marckwald und besonders F. Soddy (1911) zeigten.

Solche Elemente zeigen somit einen Grad von chemischer Analogie, wie er vor der Entdeckung der Radioaktivität nicht bekannt war. Würde es gelingen, Radium D, Ionium oder Mesothorium 1 in genügend großen Mengen in reinem Zustande zu isolieren, so würden sie von einem Chemiker auf Grund einer qualitativen Analyse als Blei[1]), Thorium bzw. Radium angesehen werden. Nur den radioaktiven Methoden ist es zu verdanken, daß man überhaupt diese Elemente als neue Individuen erkannt hat.

Diese Erscheinung wiederholt sich nun bei den meisten Radioelementen und sie erklärt uns die früheren Schwierigkeiten, die die Einordnung der Radioelemente in das periodische System bereitete.

Denn das periodische System weist offenbar nur so viele Stellen auf, wie die Zahl der Elemente beträgt, die man durch chemische oder physikalisch-chemische Methoden von allen anderen Elementen trennen kann. Wir müssen deshalb solchen Elementen, die chemisch untrennbar sind, eine gemeinsame Stelle im System zuweisen.

Nun zeigte die chemische Untersuchung aller Radioelemente, die dazu nicht zu kurzlebig waren, daß sie sich in zwei Gruppen einteilen lassen: auf der einen Seite haben wir außer den schon lange bekannten Elementen Uran und Thor noch die mit Hilfe radioaktiver Methoden entdeckten Polonium, Radiumemanation, Radium, Actinium und Protactinium (vgl. S. 42), deren besondere chemische Eigenschaften beweisen, daß ihnen je eine eigene Stelle im periodischen System entspricht.

Zu der zweiten Gruppe gehören die übrigen Radioelemente, die entweder von einem der soeben genannten Radioelemente oder

---

[1]) In der Tat konnten G. v. Hevesy und F. Paneth (16) zeigen, daß ein von ihnen nach Zerfall von Radiumemanation elektrolytisch hergestellter, eben sichtbarer Beschlag vom Superoxyd des Ra D sich elektrochemisch dem Bleisuperoxyd ganz gleich verhielt.

von Wismut, Blei bzw. Thallium durch die gewöhnlichen Methoden nicht getrennt werden können, das heißt in qualitativ-chemischer Hinsicht mit einem dieser Elemente völlig übereinstimmen (17).

3. Stellung der Radioelemente im periodischen System.

Es ergibt sich somit, daß trotz der großen Zahl neuer Elemente, die wir dank der Radioaktivität kennen gelernt haben, die Zahl der Elemententypen verschiedenen qualitativ-chemischen Verhaltens nicht größer ist, als es das periodische System zuläßt. Wenn man den chemisch untrennbaren Elementen einen gemeinsamen Platz im System zuweist, ergibt sich die Tabelle 6. In ihr sind die Elemente von unten nach oben nach fallenden Atomgewichten angeordnet [1]), wobei die ganze Tabelle den letzten zwei Horizontalreihen des Systems entspricht. Die Zugehörigkeit der allermeisten Elemente zu den betreffenden Gruppen ist experimentell sichergestellt; bei den ganz kurzlebigen Elementen wurde sie auf Grund später noch (S. 46) zu erwähnender Gesetzmäßigkeiten abgeleitet.

Wie man sieht, befinden sich z. B. an der Stelle, wo im gewöhnlichen System das Blei steht (Gruppe IVb), nicht weniger als sieben Elemente [2]), und es weist fast jede Stelle des Systems vom Uran bis Thallium eine Gruppe von mehreren Elementen auf. Eine solche Gruppe wird nach dem Vorschlage des Verfassers Plejade genannt; die Glieder einer Plejade bezeichnet man nach F. Soddy als isotope Elemente oder Isotope. Eine Plejade umfaßt also Elemente vom gleichen chemischen Typus.

Bei den letzten Betrachtungen haben wir nur die chemischen Eigenschaften der Radioelemente berücksichtigt. Nach der üblichen Auffassung entspricht aber eine Stelle im periodischen System nicht nur einem bestimmten chemischen Typus, sondern auch einem bestimmten Atomgewicht, und es galt ja als Grundlage des periodischen Systems, daß das A. G. eindeutig die chemischen Eigenschaften eines Elementes bestimmt. Unsere Tabelle 6 lehrt

[1]) Der Einfachheit halber sind die Atomgewichte auf ganze Zahlen abgerundet.

[2]) Wenn man das nicht näher bekannte Actinium D (Actiniumblei, vgl. S. 52 bis 54) nicht mitzählt.

Tabelle 6. **Die Radioelemente**

Atom-gewichte	0 (VIII)	I a	I b	II a	II b	III a	III b
197			**Au**				
200					**Hg**		
204							**Tl**
206							
(206)							β AcC'' 4,7 m
207							
208							β ThC'' 3,1 m
210							β RaC'' 1,4 m
(210)							
212							
214							
(214)							
216							
218							
(218)	α AcEm 3,9 s						
220	α ThEm 54 s						
222	α **Ra** Em 3,85 d						
(222)				α AcX 11,5 d			
224		—		α ThX 3,7 d			
226				α **Ra** 1700 a			
(226)						β Ac 20 a	
228				(β) MsTh$_1$ 6,7 a		β MsTh$_2$ 6,2 h	
230							
(230)							
232							
234							
238							

a = Jahr, d = Tag, h = Stunde, m = Minute, s = Sekunde. Die
staben α und β geben die Art der Umwandlung an, der die Elemente
Gruppe und A. G.-Verminderung um vier Einheiten statt, bei β-Um-
verändert. Die eingeklammerten Atomgewichte des Pa, UY und der

im periodischen System.

IV a	IV b	V a	V b	VI a	VI b	VII a	VII b	Atom-gewichte
								197
								200
								204
	Ra G							200
	(AcD)							(206)
	Pb							207
	ThD		**Bi**					208
	βRaD 16 a		βRaE 5 d		α**RaF** 136 d			210
	βAcB 36 m		αβAcC 2,15 m		αAcC′ (0,005 s)			(210)
	βThB 10,6 h		αβThC 61 m		αThC′ (10^{-11} s)			212
	βRaB 27 m		αβRaC 19,5 m		αRaC′ (10^{-6} s)			214
					αAcA 0,002 s			(214)
					αThA 0,14 s		—	216
					αRaA 3 m			218
								(218)
								220
								222
								(222)
								224
								226
αRdAc 19 d								(226)
αRdTh 1,9 a								228
αIo 10^5 a								230
βUY 25,5 h		α**Pa** (10^4—10^5 a)						(230)
α**Th** 1,5 . 10^{10} a								232
βUX_1 24 d		βUX_2 1,15 m		αU$_{II}$ (2 . 10^6 a)				234
				α**U**$_{I}$ 5 . 10^9 a				238

Zeitangaben bedeuten die Halbwertszeiten der Elemente, die Buch-
unterliegen. Bei α-Umwandlung findet Verschiebung zur zweitniedrigeren
wandlung Verschiebung zur nächsthöheren Gruppe, A. G. bleibt un-
Glieder der Actiniumreihe sind hypothetisch.

nun in dieser Hinsicht etwas vollkommen Neues: sie zeigt, daß nicht nur Elemente einer Plejade, die ja vollkommen gleiches chemisches Verhalten zeigen, bis um acht Einheiten verschiedene Atomgewichte aufweisen, sondern daß auch Elemente von gleichem Atomgewicht, wie z. B. RaD, RaE und RaF, einen vollkommen verschiedenen chemischen Charakter besitzen. Die so oft diskutierte, als Ausnahme vom periodischen Gesetz geltende Tatsache, daß das als Halogen in eine höhere (siebente) Gruppe gehörende Jod ein kleineres A. G. hat als das einer niedrigeren (sechsten) Gruppe angehörende Tellur, ist in den untersten zwei Reihen des periodischen Systems zwischen Uran und Thallium eine oft wiederkehrende Erscheinung. So ist das A. G. des in die Bleiplejade gehörenden Radiums B (214) um sechs Einheiten größer als das des Wismuts (208) der fünften Gruppe.

Diese ganz neuartigen überaus wichtigen Ergebnisse machen eine gründliche Revision unserer Anschauungen über die Beziehungen zwischen dem Atomgewicht und den anderen Eigenschaften der Elemente erforderlich. Sie ändern aber nichts an der Tatsache, daß in dem nicht radioaktiven Teil des periodischen Systems von Stelle zu Stelle mit sehr wenigen Ausnahmen eine mehr oder minder regelmäßige Änderung des Atomgewichtes stattfindet. Es entsteht somit die Frage, ob den letzten zwei Reihen des Systems in dieser Hinsicht eine Ausnahmestellung zukommt. Folgende Überlegung zeigt, daß dies wohl nicht der Fall wäre, wenn uns hier, wie in den anderen Teilen des Systems, nur chemische Methoden zur Verfügung ständen. Man würde dann das A. G. der als ein unzerlegbares Element erscheinenden Plejade experimentell bestimmen und dabei einen Mittelwert erhalten, den die einzelnen Glieder der Plejade nach Maßgabe ihrer Mengen im Gemisch beeinflussen würden. Das Verhältnis dieser Mengen hängt aber in erster Linie von der Lebensdauer der betreffenden Elemente ab, und da in den meisten Plejaden eines der Glieder viel langlebiger ist oder in viel größeren Mengen vorkommt als die übrigen, kann man mit genügender Annäherung sein A. G. als das in das periodische System passende ansehen. Verfährt man auf diese Weise, so bekommt man für die Atomgewichte der Plejaden Werte, welche den in der Tabelle 6 fett gedruckten Elementen gehören (vgl. auch

Tabelle 2 bis 4), und man sieht, daß die Atomgewichte der Elemente[1]) einer Horizontalreihe der gewöhnlichen Tabelle des Systems von rechts nach links mehr oder weniger regelmäßig abnehmen[2]), ähnlich wie in den übrigen Reihen des periodischen Systems; es verschwindet somit auf diese Weise die wirkliche Unregelmäßigkeit der Atomgewichte, die die vielen Elemente verursachen.

Es ergibt sich also, daß, wenn uns nur chemische Methoden zur Verfügung stehen würden, der von Uran bis Thallium reichende Teil des periodischen Systems sich durch nichts von dem übrigen Teil unterscheiden würde, und daß wir es nur den radioaktiven Methoden zu verdanken haben, wenn es gelungen ist, die tatsächliche, in jenem Teil herrschende große Mannigfaltigkeit der Elemente kennen zu lernen. In den radioaktiven Methoden besitzen wir also ein überaus wertvolles Mittel zur Erkennung von Elementen, und wie die Existenz der Isotopen beweist, ist dieses neue Mittel viel feiner als die qualitative chemische Analyse. Auf Grund dieser hat man z. B. auch das Uran bis vor kurzem für ein einheitliches Element gehalten, während es, wie wir gleich sehen werden, jetzt als ein Gemisch zweier isotoper Elemente Uran I und Uran II angesehen werden muß (18).

IV. Die Verschiebungssätze und ihre Anwendungen.

1. Allgemeines.

In der Tabelle 6 scheinen die Elemente zusammenhanglos dazustehen. Wir wissen aber, daß sie durch die genetischen Beziehungen verknüpft sind, die in den drei radioaktiven Reihen zur Geltung kommen, und es fragt sich, ob denn nicht ein Zusammenhang besteht zwischen der Reihenfolge der Elemente in den Umwandlungsreihen einerseits und ihrer Stellung im periodischen System andererseits. Dies ist in der Tat der Fall. Nachdem Soddy (1911) wichtige Ansätze zur Aufklärung der hier geltenden Gesetzmäßigkeiten gemacht hatte, wurden diese in ihrer vollen Allgemeinheit im Jahre 1913 vom Verfasser und bald darauf von Soddy aufgestellt (18).

---

[1]) Vielleicht mit Ausnahme des Protactiniums (Pa), vgl. S. 49.
[2]) Vgl. auch Tabelle 9.

Es handelt sich dabei um folgende zwei Sätze, die die beiden Arten von Umwandlungen, die wir früher kennen gelernt haben, nämlich die α-Strahlenumwandlungen und β-Strahlenumwandlungen scharf voneinander trennen.

1. Nach einer α-Umwandlung findet man das entstandene Element zur zweitniedrigeren Gruppe des periodischen Systems (zwei Gruppen nach links in einer Horizontalreihe) von seiner Muttersubstanz verschoben.

2. Nach einer β-Umwandlung findet eine Verschiebung zur nächsthöheren Gruppe (um eine Gruppe nach rechts) statt.

So sehen wir (vgl. Tabelle 5 und 6), daß die α-Umwandlung des in die Gruppe IVa gehörenden Ioniums das Glied der Gruppe IIa das Radium ergibt, von welchem eine weitere α-Umwandlung zur Emanation führt, die in der nullten Gruppe ihren Platz findet. Bei der β-Umwandlung sehen wir dagegen einen Übergang vom Radium D der Gruppe IVb zum Radium E der Gruppe Vb und von diesem zum Radium F der Gruppe VIb. Diese zwei „Verschiebungssätze" gelten auch in der Thorium- und der Actiniumreihe ausnahmslos.

Zur Zeit der Aufstellung dieser Sätze war die chemische Natur vieler Radioelemente noch unbekannt, und die diesbezüglichen auf Grund der neuen Sätze vom Verfasser gemachten Voraussagen haben sich ausnahmslos bestätigt. Von besonderem Interesse ist es aber, daß es an der Hand der Verschiebungssätze gelungen ist, zwei neue Radioelemente zu entdecken, nämlich das Uran X_2 und das Protactinium, denen beiden die vorher freie Stelle in der fünften Gruppe und letzten Horizontalreihe des periodischen Systems zukommt.

2. Uran X_2.

Vor der Aufstellung der Verschiebungssätze hat man auf Grund von rein radioaktiven Tatsachen die Umwandlungen am Anfange der Uranreihe durch folgendes Schema dargestellt:

$$\underset{\text{VI}}{U_I} \xrightarrow{\alpha} \underset{\text{VI}}{U_{II}} \xrightarrow{\alpha} \underset{\text{IV}}{UX} \xrightarrow{\beta} \underset{\text{IV}}{Io} \xrightarrow{\alpha} \underset{\text{II}}{Ra}.$$

Das Element Uran II ist bis jetzt nicht isoliert worden, seine Existenz ergibt sich aber aus dem von H. Geiger und J. M. Nuttall

geführten Nachweis, daß das von den Chemikern für ein einheitliches Element gehaltene Uran zwei Arten von α-Strahlen mit verschiedener Reichweite aussendet. Daraus und auf Grund der von denselben Forschern aufgestellten S. 29 erwähnten Beziehung zwischen Lebensdauer der α-Strahler und der Reichweite der von ihnen emittierten α-Strahlen folgt, daß das Uran ein Gemisch zweier Elemente (Uran I und Uran II) von verschiedener Lebensdauer sein muß, und zwar ergibt sich aus dieser Beziehung die Halbwertszeit des Urans II zu etwa 2×10^6 Jahren (vgl. Fig. 3). Da es nicht möglich war, das Uran II vom Uran (Uran I) auf chemischem Wege zu trennen, muß man folgern, daß diese zwei Elemente isotop sind, also beide in die Gruppe VIa gehören[1].

Der Versuch, auf das obige Schema die Verschiebungssätze anzuwenden, führte zu einem doppelten Widerspruch: weder die α-Umwandlung des Urans I noch die β-Umwandlung des UX wäre danach von der geforderten Verschiebung begleitet, denn auch UX und Ionium sind isotop, sie gehören beide der Thoriumplejade an. Das obige Schema wurde deshalb von Soddy, A. S. Russell u. a. folgendermaßen umgestellt:

$$\underset{\text{VI}}{U_I} \xrightarrow{\alpha} \underset{\text{IV}}{UX} \xrightarrow{\beta} \underset{\text{VI}}{U_{II}} \xrightarrow{\alpha} \underset{\text{IV}}{Io.}$$

Letzteres Schema war vom radioaktiven Standpunkte aus ebenso annehmbar wie das vorige. Nach diesem Schema würde aber die β-Umwandlung des UX eine Verschiebung statt um eine Gruppe eine solche um zwei Gruppen hervorrufen. Russell und der Verfasser stellten deshalb die Hypothese auf, daß das UX aus zwei Elementen besteht, welche β-Strahlen emittieren und daß also das richtige Schema zu formulieren wäre:

$$\underset{\text{VI}}{U_I} \xrightarrow{\alpha} \underset{\text{IV}}{UX_1} \xrightarrow{\beta} \underset{\text{V}}{UX_2} \xrightarrow{\beta} \underset{\text{VI}}{U_{II}} \xrightarrow{\alpha} Io.$$

---

[1]) Obwohl das Uran ein Gemisch von Uran I und Uran II darstellt, deren Atomgewichte um vier Einheiten differieren müssen, entspricht das experimentell bestimmte A. G. des Urans 238,2 praktisch dem Uran I. Denn die Mengen des Urans I und Urans II stehen in dem aus den Mineralien isolierten Gemisch im radioaktiven Gleichgewicht miteinander und verhalten sich deshalb zueinander wie die Halbwertszeiten der Elemente, also wie $2 \times 10^6 : 5 \times 10^9$, woraus folgt, daß Uran II nur eine Beimengung unter 1 pro Mille bildet.

In der Tat haben Versuche, die zur Prüfung dieser Hypothese vom Verfasser mit O. Göhring unternommen wurden, zur Isolierung des unbekannten Elementes UX_2 (Uran X_2) geführt (1913). Es erwies sich als ein kurzlebiges, β-Strahlen emittierendes Produkt mit einer Halbwertszeit von 1,15 Minuten. Die Entdeckung des UX_2 wurde dadurch wesentlich erleichtert, daß man auf Grund des letzteren Schemas seine Zusammengehörigkeit zur Gruppe Va des periodischen Systems voraussehen konnte. Es mußte also ein höheres Homologes des Tantals vorstellen. So konnte denn auch das Uran X_2 unter anderem dadurch gewonnen werden, daß es zusammen mit Tantalsäure aus UX auf chemischem Wege abgetrennt wurde, ähnlich wie man z. B. das Radium aus einem Gemisch mit anderen Elementen am besten mit Barium abscheiden kann.

Da das UX_2 eine vorher unbesetzte Stelle im periodischen System einnimmt, hat es einen neuen Namen erhalten, seiner Kurzlebigkeit wegen wurde es Brevium genannt (vgl. S. 45).

3. Protactinium, die Muttersubstanz des Actiniums.

Der vor kurzem erfolgten Entdeckung dieses Elementes kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie gleichzeitig eine wesentliche Klärung der Frage der Actiniumgenesis brachte.

Das Actinium ist, wie man bereits seit längerer Zeit vermutete, kein sehr langlebiges Element, seine Halbwertszeit beträgt nach den kürzlich veröffentlichten, sich über mehrere Jahre erstreckenden Messungen von O. Hahn und L. Meitner (19) nur etwa 20 Jahre. Es muß also eine langlebige Muttersubstanz besitzen, und da es stets einen Bestandteil der Uranmineralien bildet, mußte man einen genetischen Zusammenhang der Actiniumreihe mit der Uran-Radiumreihe annehmen. Die sich aus dieser Ansicht ergebende Forderung, daß zwischen den Aktivitäten des Urans und des Actiniums in verschiedenen Mineralien ein konstantes Verhältnis bestehen muß, darf man nach B. Boltwood und besonders auf Grund der neuen Messungen von St. Meyer und V. F. Hess (20a) als erfüllt ansehen. Nun ist aber, wie Boltwood zeigte, die Aktivität des Actiniums und seiner Umwandlungsprodukte in den Mineralien bedeutend kleiner,

als sie zu erwarten wäre, wenn die auch sonst sehr unwahrscheinliche Annahme zutreffen würde, daß die Actiniumreihe eine direkte Fortsetzung der Uran-Radiumreihe bildet. Rutherford schloß deshalb schon im Jahre 1906, daß die Actiniumreihe eine Abzweigung von der Uran-Radiumreihe vorstellt, und zwar in der Weise, daß eines von den Gliedern letzterer Reihe einer doppelten Umwandlung unterliegt, indem sich 92 Proz. seiner Atome in das nächste Glied der Uran-Radiumreihe umwandeln, und nur die Umwandlung der übrigen 8 Proz.[1]) zur Actiniumreihe führt. Derartige doppelte Umwandlungen und Verzweigungen wurden ja später in der Tat bei den C-Gliedern, zuerst für das Ra C (Fajans 1911), direkt nachgewiesen.

Es blieb aber lange Zeit unklar, an welcher Stelle der Uran-Radiumreihe die Abzweigung der Actiniumreihe stattfindet, denn alle Versuche, eine Bildung des Actiniums aus einem der Glieder der Uranreihe nachzuweisen, blieben erfolglos. Erst die Verschiebungssätze wiesen neue Wege für die Untersuchung auch dieser Frage.

Das ganze chemische und elektrochemische Verhalten des Actiniums, das mit seltenen Erden aus der Pechblende abgeschieden wird, läßt keinen Zweifel darüber, daß ihm die vorher freie Stelle in der dritten Gruppe (III a) und letzten Horizontalreihe des periodischen Systems zukommt. Faßt man also die zwei bekannten Arten von Umwandlungen, die α- und die β-Umwandlungen ins Auge, so könnte das Actinium entweder durch eine α-Umwandlung aus einem Element der Gruppe V a, d. h. aus einem Glied der Breviumplejade oder durch eine β-Umwandlung aus einem Element der Gruppe II a, d. h. einem Glied der Radiumplejade entstehen. Das einzige bekannte Element der Breviumplejade, das UX_2, sendet aber keine α-Strahlen aus und kam auch aus dem Grunde nicht als Muttersubstanz des Actiniums in Frage, weil es sonst leicht gelingen müßte, die direkte Bildung des Actiniums aus Uran nachzuweisen. Als Element der zweiten Gruppe kam in der Uran-Radiumreihe nur das Radium selbst in Betracht. Dieses

[1]) Nach neuen Untersuchungen von O. Hahn und L. Meitner beträgt dieses sogenannte Verzweigungsverhältnis nicht 8 : 92, sondern nur 3 : 97.

liefert einerseits α-Strahlen, was mit der Verschiebung um zwei Gruppen bei der Bildung der Emanation im vollen Einklang steht. Andererseits findet man aber beim Radium auch β-Strahlen und diese könnten als ein Anzeichen einer zweiten Umwandlung in ein Element der dritten Gruppe aufgefaßt werden, ähnlich wie im Falle der Verzweigungen bei den C-Gliedern. Nachdem aber die zur Prüfung dieser Hypothese angestellten Versuche gezeigt hatten, daß aus Radium kein Actinium entsteht, kam keines der bekannten Elemente der Uran-Radiumreihe als Muttersubstanz des Actiniums in Betracht, und es mußte nach einem neuen unbekannten Element gesucht werden, um die Frage der Actiniumgenesis aufzuklären (20).

Aus folgenden Gründen wurde dabei von Soddy, Hahn und Meitner u. a. angenommen, daß die vermutete Muttersubstanz des Actiniums ein Glied der fünften Gruppe vorstellt und mit dem von G. Antonoff (1911) entdeckten Uran Y (Halbwertszeit 25,5 Stunden) genetisch zusammenhängt. Das Uran Y bildet sich aus dem Mischelement[1]) Uran, und zwar entweder aus Uran I oder aus Uran II. Nun unterliegen ja diese beiden Elemente anderen bereits bekannten Umwandlungen, und es muß somit das Uran Y als ein Abzweigungsprodukt der Uranreihe aufgefaßt werden. Das chemische Verhalten des Urans Y zeigt, daß es zur Gruppe IVa, nämlich zur Thoriumplejade gehört. Da es β-Strahlen aussendet, muß sein Umwandlungsprodukt isotop mit UX_2 sein und könnte somit mit der gesuchten Muttersubstanz des Actiniums identisch sein. Diese müßte aber ziemlich langlebig sein, weil es sonst ebenfalls in kurzer Zeit gelingen müßte, die Bildung des Actiniums aus Uran nachzuweisen.

Durch diese Überlegungen geleitet, haben Otto Hahn und Lise Meitner in der Pechblende und in den Fabrikrückständen nach der Verarbeitung der Pechblende auf Uran und Radium nach einem langlebigen Element der fünften Gruppe gesucht, und es ist ihnen in der Tat gelungen (19), mit Tantalsäure ein Element abzuscheiden, das α-Strahlen emittiert, und bei dessen Umwandlung die Bildung des Actiniums nachgewiesen werden konnte. Die

---

[1]) F. Paneth hat für Gemische von Isotopen den Ausdruck „Mischelement" vorgeschlagen.

Lebensdauer des neuen Elementes konnte bis jetzt noch nicht direkt bestimmt werden, doch ergibt sich aus der Reichweite seiner α-Strahlen auf Grund der Geigerschen Beziehung, daß die Halbwertszeit dieses, Protactinium (Pa) benannten Elementes zwischen 1200 und 180000 Jahren liegen dürfte. Diese relativ hohen Werte erlauben zu hoffen, daß es gelingen wird, das Protactinium in wägbaren Mengen in chemisch reinem Zustande zu isolieren. Dann wird sich auch das Atomgewicht dieses Elementes direkt bestimmen und daraus auch das A. G. aller Produkte der Actiniumreihe berechnen lassen.

Unabhängig von diesen ausgezeichneten Untersuchungen von Hahn und Meitner haben auch F. Soddy und J. A. Cranston (19) die Existenz des Protactiniums, das sie Ekatantal nennen, erwiesen. Sie erhitzten Pechblende im Tetrachlorkohlenstoffstrom unter Bedingungen, bei welchen Tantalsäure und Uran X_2 flüchtig sind und konnten in dem erhaltenen Sublimat die allmähliche Bildung des Actiniums nachweisen. In diesem flüchtigen Anteil der Pechblende war also die gesuchte Muttersubstanz des Actiniums enthalten.

Daß das Protactinium aus Uran Y entsteht, ist noch nicht direkt bewiesen, doch spricht dafür unter anderem der Umstand, daß das allerdings nicht sehr genau bekannte Verhältnis, in dem das Uran Y von der Uran-Radiumreihe abgezweigt wird, nahe dem für die Actiniumreihe neuerdings zu 3 : 97 angegebenen Abzweigungsverhältnis zu liegen scheint. Folgendes Schema wird somit zurzeit als das wahrscheinlichste angesehen:

$$\begin{array}{ccccccccccccc} U_{I} & \xrightarrow{\alpha} & UX_1 & \xrightarrow{\beta} & UX_2 & \xrightarrow{\beta} & U_{II} & \xrightarrow{\alpha} & Io & & & & \\ \mathrm{VI} & & \mathrm{IV} & & \mathrm{V} & & \mathrm{VI} & & \mathrm{IV} & & & & \\ & & & & & & & \searrow^{\alpha} & UY & \xrightarrow{\beta} & Pa & \xrightarrow{\alpha} & Ac \\ & & & & & & & & \mathrm{IV} & & \mathrm{V} & & \mathrm{III} \end{array}$$

Die in dem Schema gemachte Annahme, daß das Uran Y aus dem Uran II, nicht aus Uran I entsteht, wird auf S. 50 begründet.

Dem Protactinium kommt im periodischen System dieselbe Stelle zu, wie dem Uran X_2, und da es als das bei weitem langlebigere Element den Namen der Plejade bestimmt, besteht für die Bezeichnung Brevium kein Bedürfnis mehr.

4. Andere Folgerungen.

Die Verschiebungssätze ermöglichen weiterhin die chemische Natur der ganz kurzlebigen, der direkten chemischen Prüfung unzugänglichen Elemente AcA und AcC', ThA und ThC', sowie des RaC' und RaC'' anzugeben, denn man ersieht leicht aus den Tabellen, daß den Verschiebungssätzen nur dann Folge geleistet wird, wenn man annimmt, daß das RaC'' ein Glied der Thalliumplejade (Gruppe III b) ist und die übrigen fünf Elemente zur Gruppe VI a, also zur Poloniumplejade gehören. Es führen somit die α-Umwandlungen der Emanationen aus der nullten Gruppe der letzten Horizontalreihe in die sechste der vorletzten, so daß der nullten Gruppe auch der Charakter der achten Gruppe zukommt. Dadurch rechtfertigt sich die aus anderen Gründen von manchen Autoren bereits früher empfohlene, aus der Tabelle 9 zu ersehende Vereinigung der achten und nullten Gruppe.

Auch in bezug auf die strahlenlosen Umwandlungen des Actiniums und Mesothoriums 1 lassen sich aus den Verschiebungssätzen gewisse Folgerungen ziehen, die im Kap. XII, 3 Erwähnung finden werden.

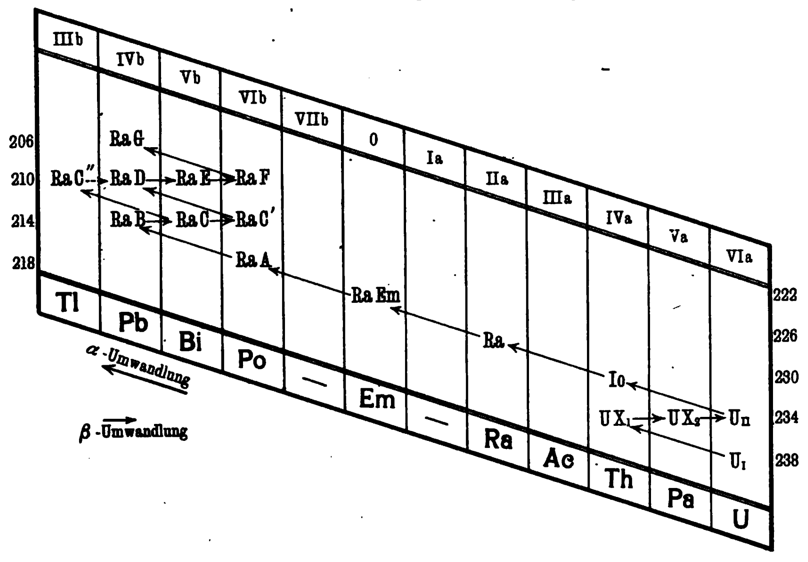
Mit Hilfe der Verschiebungssätze können wir jetzt genau die Reihenfolge beobachten, in der die Umwandlungen der Radioelemente die Gruppen des periodischen Systems durchlaufen. Es sei nur noch hinzugefügt, daß die drei radioaktiven Reihen sehr weitgehende Analogien zeigen. Vom Radiothorium, Ionium und Radioactinium ab, die eine Gruppe chemisch untrennbarer Elemente bilden, nämlich alle in die Thoriumplejade gehören, verlaufen die Umwandlungen in allen drei Reihen in identischer Weise. Diese drei Elemente unterliegen derselben Art der Umwandlung, wodurch wiederum chemisch identische Elemente entstehen, die ihrerseits gleiche Umwandlungen erleiden. Und das wiederholt sich bis an das Ende der Reihen, und zwar sind die analogen Elemente der drei Reihen nicht nur chemisch identisch und emittieren dieselbe Art der Strahlung, sondern auch die Abstufung ihrer Lebensdauer weist Regelmäßigkeiten auf, die wir gleich näher betrachten werden. Zwischen dem weiteren Verlauf der drei Reihen

besteht nur der Unterschied, daß die Thorium- und die Actiniumreihe früher abbrechen als die Uran-Radiumreihe.

Wenn wir nun z. B. letztere Reihe näher verfolgen, so sehen wir (vgl. die Tabellen 6 u. 7), wie vom Uran I der sechsten Gruppe eine α-Umwandlung in die vierte Gruppe führt und dann nach zwei β-Strahlenumwandlungen wieder ein Element (U_{II}) der

Tabelle 7.

Uran-Radiumreihe im periodischen System[1].



sechsten Gruppe entsteht, das mit dem ersten chemisch völlig übereinstimmt. Dann geht es durch drei α-Umwandlungen über die vierte und zweite Gruppe zur nullten usw. Ähnliches gilt für die anderen zwei Reihen, und wir können uns nun leicht das Zustandekommen der Plejaden erklären. Zum Teil rühren sie von dem Vorhandensein dreier analoger radioaktiver Reihen her, zum Teil daher, daß in mehreren Fällen nach einer α-Umwandlung zwei β-Umwandlungen folgen.

---

[1]) Die Symbole der untersten Reihe bedeuten den chemischen Typus der Elemente.

V. Atomgewicht und Lebensdauer der Isotopen.

Die Glieder einer solchen Plejade unterscheiden sich voneinander hauptsächlich durch ihre radioaktiven Eigenschaften, nament lich die Lebensdauer, und durch das Atomgewicht. In jeder Plejade kommen sehr verschiedene Atomgewichte vor, und in vielen Fällen sind in einer linksstehenden Plejade die Atomgewichte einiger Elemente um mehrere Einheiten größer als die mancher Elemente einer rechtsstehenden Plejade. Und doch haben wir ein mehr oder weniger regelmäßiges Abfallen der Atomgewichte von rechts nach links gefunden, als wir, um in Übereinstimmung mit den nichtradioaktiven Elementen zu bleiben, das A. G. des langlebigsten Gliedes jeder Plejade als in das allgemeine System passende nahmen. Dieses Resultat deutete darauf hin, daß die Lebensdauer der Elemente innerhalb der Plejaden nicht regellos verteilt sein könne. Der Verfasser suchte deshalb nach Beziehungen zwischen A. G. und Lebensdauer der Isotopen, und es konnten in der Tat gewisse Regelmäßigkeiten aufgefunden werden, hinter denen ein tieferer Sinn verborgen zu sein scheint. Sie sollen hier auch aus dem Grunde angeführt werden, weil sie zurzeit die einzige Möglichkeit zur genaueren Schätzung des A. G. des Actiniums bieten.

Betrachtet man zunächst nur die Glieder der Uran-Radium- und der Thoriumreihe, deren Atomgewichte ja mit großer Annäherung bekannt sind, so zeigt sich (vgl. Tabelle 6), daß innerhalb einer Plejade die Lebensdauer (Halbwertszeit) der α-Strahler mit fallendem A. G. abnimmt, während die Lebensdauer der β-Strahler mit fallendem A.G zunimmt. Die einzige Ausnahme bildet das Polonium (RaF), welches bei weitem das langlebigste Glied seiner nur aus α-Strahlern bestehenden Plejade vorstellt, obwohl sein A. G. am kleinsten ist.

Es entsteht sofort die Frage, welches A. G. Actinium besitzen müßte, damit die Glieder seiner Familie sich diesen Regeln unterordnen. Wie die Tabelle 6 zeigt, erhielte man die beste Übereinstimmung, wenn man dem Actinium ein A. G. zwischen 226

und 228, also ungefähr 227[1]) zuschreiben würde. Die Reihenfolge der Atomgewichte analoger Produkte der drei Reihen wäre dann: Uran-Radiumreihe, Thoriumreihe, Actiniumreihe, z. B. bei den drei Emanationen RaEm 222, ThEm 220, AcEm 219[1]). Sieht man einstweilen von der Wismutplejade ab, in der die C-Glieder sowohl α- wie β-Strahler vorstellen, so weisen von den Gliedern der Actiniumreihe nur AcX und AcB kleine Abweichungen von der Regel auf, während AcC′ dieselbe auffallende Anomalie zeigt, die schon beim RaF erwähnt wurde und die, worauf R. Swinne hingewiesen hat, in der Poloniumplejade zu einem ausgeprägten Minimum der Lebensdauer beim ThC′ führt.

Das Verhalten der C-Glieder muß gesondert besprochen werden. Die obigen Regeln zeigen, daß innerhalb einer Plejade im allgemeinen mit fallendem A. G. die Tendenz zur α-Umwandlung steigt, die zur β-Umwandlung dagegen fällt. Unterliegen also Isotope, wie die C-Glieder, sowohl α- wie β-Umwandlungen, so ist zu erwarten, daß mit fallendem A. G. ein immer stärkeres Überwiegen der α-Umwandlung über die β-Umwandlung zum Vorschein kommt, was bei RaC, ThC und AcC in der Tat der Fall ist: während vom ersteren nur 0,03 Proz. aller Atome α-Strahler sind, erleiden bei letzteren fast alle, nämlich 99,85 Proz., die α-Umwandlung. Das ThC mit dem Verzweigungsverhältnis 35/65 steht dazwischen. In derselben Weise kann man die Tatsache deuten, daß, wenn in einer Plejade sowohl α- wie β-Strahler vorkommen, letztere ein höheres A. G. zeigen als erstere, wie man im Falle des UX_1 und $MsTh_1$ sieht Der reine β-Strahler RaE bildet jedoch eine Ausnahme von diesem Verhalten.

Versucht man, das den obigen Regeln fürs Actinium am besten entsprechende A. G. 227 mit der Frage der Genesis dieses Elementes in Zusammenhang zu bringen, so ergibt sich folgendes: Es ist wahrscheinlich, daß das Protactinium durch eine β-Umwandlung aus Uran Y entsteht; je nachdem ob letzteres (durch eine α-Umwandlung) aus Uran I oder aus Uran II gebildet wird, wäre das übereinstimmende Atomgewicht des Urans Y und des Protactiniums zu 234 oder 230 anzunehmen und das des Actiniums also zu 230

[1]) Aus gleich zu erwähnenden Gründen wurde in der Tabelle statt 227 der eingeklammerte Wert 226 angenommen.

oder 226. Letzterer in der Tabelle 6 eingesetzter Wert entspricht zwar weniger gut den Beziehungen zwischen Lebensdauer und Atomgewicht als der Wert 227, widerspricht ihnen aber nicht. Wäre indessen das A. G. des Actiniums gleich 230, so würden die obigen Regeln fast für sämtliche Glieder der Actiniumreihe versagen. Deshalb muß es für wahrscheinlich gelten, daß entsprechend dem auf S. 45 dargestellten Schema das Uran Y, wenn es die Muttersubstanz des Protactiniums ist, sich von Uran II, nicht von Uran I ableitet. Allerdings widerspricht wiederum das in diesem Falle zu 230 sich ergebende A. G. des Urans Y den Regeln, während der Wert 234 ihnen besser entspräche. Es bedarf also entweder der Zusammenhang des Protactiniums mit Uran oder die Beziehung zwischen Lebensdauer und Atomgewicht der Isotopen noch einer näheren Klärung (21).

VI. Die Endprodukte der Zerfallsreihen und die isotopen Bleiarten.

1. Theoretisches.

Wie aus obigem zu ersehen ist, hat die Einführung des neuen Begriffes der Isotopie eine durchaus befriedigende chemische Systematik der Radioelemente ermöglicht. Außerdem ist dieser Begriff auch für die allgemeine Chemie von großer Tragweite, ihm liegt ja die Behauptung zugrunde, daß es Elemente gibt, die trotz verschiedener Atomgewichte (bis zu acht Einheiten) eine praktisch vollständige Übereinstimmung ihres qualitativ-chemischen Verhaltens aufweisen.

Allerdings haben die oben zugunsten der Isotopentheorie vorgebrachten Tatsachen für den Chemiker keine genügende Beweiskraft. Man darf ja nicht vergessen, daß wegen der Kurzlebigkeit der Radioelemente ihre chemischen Eigenschaften nicht in reinem Zustande, sondern nur in Gemischen mit anderen Stoffen studiert worden sind, und daß auch ihre Atomgewichte nicht direkt, sondern rechnerisch ermittelt wurden. Dieser etwas unbefriedigende Zustand dauerte aber nicht lange an, denn es ergab sich sofort eine Möglichkeit, die obige Hauptannahme der Isotopentheorie mit ge-

wöhnlichen chemischen Methoden direkt zu beweisen, als die neuen Gesichtspunkte und die Verschiebungssätze auf die Frage der Endprodukte der radioaktiven Reihen angewandt wurden.

Es ist gelungen, die radioaktiven Reihen bis zu den Elementen RaC'' und RaF, ThC' und ThC'' und AcC' und AcC'' zu verfolgen. Deren Umwandlungsprodukte konnten radioaktiv nicht mehr nachgewiesen werden, und man nahm gewöhnlich an, daß sie stabil seien. Man nannte sie deshalb Endprodukte der Reihen und vermutete, daß diese mit einem oder mehreren der gewöhnlichen Elemente identisch sind. Vor der Einreihung der Radioelemente in das periodische System ist es nur im Falle des Ra G, des Umwandlungsproduktes des RaF, gelungen, die Frage nach seiner Natur mit großer Wahrscheinlichkeit zu beantworten.

Nach einer zuerst von B. Boltwood (1905) geäußerten Ansicht bildet das Blei das Endprodukt der Uran-Radium-Poloniumreihe. Diese Auffassung stützte sich hauptsächlich auf die Tatsache, daß man Blei in allen Uranmineralien findet, und zwar in Mengen, die bei Mineralien gleichen geologischen Alters proportional dem Urangehalt sind und bei verschieden alten Mineralien mit dem Alter steigen. Beides ist zu erwarten, wenn das Blei durch den langsamen Zerfall des Urans entsteht und im Laufe geologischer Zeiten in dem Mineral akkumuliert wird[1]). Auch die Betrachtung der Atomgewichte schien zunächst diese Auffassung zu stützen. Ging man von dem früher geltenden Werte für das A. G. des Urans I (238,5) oder des Radiums (226,4) aus, so erhielt man in bekannter Weise für das zu erwartende A. G. des RaG den Wert 206,5 bzw. 206,4, dem das A. G. des Bleies (207,1) von allen gewöhnlichen Elementen am nächsten stand. Die bestehende Diskrepanz dachte man auf kleine Unsicherheiten der Atomgewichte zurückführen zu können. Nun hat aber die Revision der betreffenden Atomgewichte den Unterschied nicht verkleinert, sondern wesentlich vergrößert. Aus den jetzt geltenden Werten für das A. G. des U_I (238,2) und Ra (226,0) berechnet sich das A. G. des

[1]) Da man die Zerfallsgeschwindigkeit des Urans kennt, läßt sich aus der Bestimmung des Mengenverhältnisses Blei/Uran im Mineral sein absolutes Alter annähernd ermitteln. Näheres vgl. die zusammenfassende Darstellung von Lawson (22).

RaG zu 206,2 bzw. 206,0, während das A. G. des Bleies nach neueren Bestimmungen 207,20 beträgt (23).

Die Einreihung der Radioelemente in das periodische System und der Begriff der Isotopie ergaben nun den Weg zur Aufklärung dieses Widerspruches und gleichzeitig auch wichtige Aufschlüsse über die Natur der übrigen „Endprodukte". Die Anwendung der Verschiebungssätze auf die Umwandlungen der obengenannten sechs Elemente ergibt (vgl. Tabelle 5), daß ihre Umwandlungsprodukte sämtlich in die Bleiplejade gehören. Im Falle des RaG steht dieses Resultat in bezug auf das qualitativ-chemische Verhalten in bester Übereinstimmung mit der Boltwoodschen Hypothese. Der erwähnte Widerspruch der Atomgewichtsbetrachtung ließ sich dabei durch die Annahme erklären, daß das RaG, d. h. das in Uranmineralien vorkommende „Blei" dem gewöhnlichen Blei zwar in chemischen Eigenschaften, nicht aber im A. G. gleicht, d. h. mit ihm nicht identisch, sondern isotop ist.

Die beiden Umwandlungsprodukte des ThC′ und ThC″ haben gleiche chemische Eigenschaften (beide sind Isotope des Bleies), und auch ihr berechnetes A. G. ist gleich, und zwar 208,1. Vom chemischen Standpunkt betrachtet, können wir sie deshalb als ein Element auffassen und Thoriumblei (oder ThD) nennen. Es muß in Thormineralien vorzufinden sein. Sollte das Thorblei nicht vollkommen stabil sein, was im Bereich der Möglichkeit liegt, so wäre es nicht ausgeschlossen, daß seine zwei Bestandteile verschiedene Lebensdauer haben.

Aus denselben Gründen wie beim Thoriumblei können wir auch die Umwandlungsprodukte des AcC′ und AcC″ vom chemischen Standpunkt als ein Element betrachten, und werden es Actiniumblei (AcD) nennen. Sein zu erwartendes A. G. hängt von dem unbekannten A. G. des Actiniums selbst ab. Wenn letzteres gleich 226 bzw. 227 ist, so ist das A. G. des Actiniumbleies zu 206 bzw. 207 anzunehmen. Da das Actinium aus Uran entsteht, muß das Actiniumblei ebenfalls in Uranmineralien sich vorfinden, und da es vom RaG chemisch untrennbar ist, wird das aus diesen Mineralien gewinnbare „Blei" — das Uranblei — ein Gemisch von RaG und AcD vorstellen. Da aber die Actiniumreihe eine Ab-

zweigung im Verhältnis von nur 3:97 von der Haupturanreihe bildet, kann das AcD das A. G. des Uranbleies nur wenig beeinflussen.

Obige Betrachtungen, die vom Verfasser und von Soddy in der Hauptsache schon gelegentlich ihrer ersten Arbeiten über die Einreihung der Radioelemente in das periodische System angestellt wurden[1]), zeigten, daß es mehrere radioaktiv nicht nachweisbare Bleiarten geben muß, deren Atomgewichte zwischen den stark verschiedenen Werten 206,0 und 208,1 liegen, während das A. G. des gewöhnlichen Bleies 207,2 beträgt. Es eröffnete sich somit der Weg, direkt experimentell die Existenz von Bleiarten mit verschiedenen Atomgewichten festzustellen, wenn es gelang, die betreffenden Elemente voneinander getrennt zu erhalten. Die zur Prüfung dieser Überlegungen angestellten Versuche haben nun gezeigt, daß dies in der Tat möglich ist.

2. Uranblei.

Als Ausgangsmaterial für derartige Untersuchungen sind als Idealfälle thorfreie Uranmineralien und uranfreie Thormineralien zu betrachten. Erstere sind leicht zugänglich, und es konnte deshalb die Frage des Uranbleies einer gründlichen Untersuchung unterzogen werden.

Schon die ersten auf die Anregung des Verfassers ausgeführten Bestimmungen von Th. W. Richards und M. Lembert (1914), sowie die gleichzeitig mitgeteilten Versuche von Maurice Curie und O. Hönigschmid ergaben für das A. G. sorgfältigst gereinigter Bleipräparate[2]), die aus verschiedensten Uranmineralien stammten, Werte zwischen 206,4 und 206,9, die sämtlich niedriger lagen als das nach gleichen Methoden zu 207,2 bestimmte A. G. des gewöhnlichen Bleies.

---

[1]) Auf die Möglichkeit, daß das Radium G ein vom gewöhnlichen Blei abweichendes A. G. besitzt, hat etwas früher A. Russell privatim hingewiesen (24).

[2]) Im folgenden wird die Bezeichnung „Blei", ohne nähere Angabe, ob gewöhnliches oder radioaktiv entstandenes „Blei" gemeint ist, für in wägbaren Mengen zugängliche Glieder der Bleiplejade oder ihre Gemische benutzt.

Alle diese Resultate haben mit Sicherheit bewiesen, daß in Uranmineralien ein auf chemischem Wege vom Blei untrennbares Element sich befindet, dessen A. G. beträchtlich niedriger als das des gewöhnlichen Bleies ist. Das steht mit den Erwartungen der Theorie, wonach RaG mit dem A. G. 206,0 in diesen Mineralien sich befinden sollte, qualitativ im besten Einklang. Die Schwankungen, die Präparate verschiedenen Ursprungs zeigten, sprachen jedoch dafür, daß man es bei den meisten der untersuchten Proben nicht mit reinem radioaktiv entstandenen Uranblei zu tun hatte, sondern daß sie wohl durch gewöhnliches Blei, das von Begleitmineralien stammt, verunreinigt waren. Hönigschmid und Stefanie Horovitz untersuchten deshalb bald darauf Bleipräparate aus sehr reiner kristallisierter Pechblende (aus Morogoro in Deutsch-Ostafrika) und aus Bröggerit (Moos-Norwegen) und erhielten für das A. G. die Werte 206,05 bzw. 206,06, während Richards und Ch. Wadsworth aus kristallisiertem norwegischen Cleveit ein Blei mit dem A. G. 206,08 und aus Bröggerit ein solches mit 206,12 isolierten. Der niedrigste dieser Werte (206,05) steht in sehr naher Übereinstimmung mit dem für das RaG aus dem A. G. des Radiums sich ergebenden Wert 205,94[1]). Ob der etwas höhere experimentelle Wert durch das Vorhandensein des gewöhnlichen Bleies bedingt ist, oder ob hier noch andere unbekannte Umstände mitspielen, läßt sich vorerst nicht entscheiden. Auch über das A. G. des im Uranblei jedenfalls nur in sehr geringer Menge vorhandenen Actiniumbleies läßt sich aus diesem Resultat nichts Sicheres entnehmen.

Im folgenden wird bei Besprechung der verschiedenen Bleiarten ihr A. G. über dem Symbol Pb angegeben, so daß z. B. $\overset{206,0}{\mathrm{Pb}}$ mit RaG identisch ist. Das Symbol Pb wird wie bis jetzt nur für das gewöhnliche Blei = $\overset{207,20}{\mathrm{Pb}}$ gebraucht werden. Ist jedoch Blei, gleichgültig von welchem A. G., gemeint, d. h. irgendwelche Elemente des Bleitypus oder ihre Gemische, so werden wir das Symbol **Pb** benutzen.

---

[1]) Nach Abzug vom A. G. des Radiums (225,97) für fünf Heliumatome 5 . 4,00 = 20,00 und 0,03 für die Massenverminderung infolge Energieabgabe.

Die obenerwähnte Annahme, daß die aus weniger sorgfältig ausgesuchten Uranmineralien stammenden Bleiarten mit Atomgewichten bis zu 206,9 keine besonderen Elemente, sondern Gemische von radioaktiv entstandenem Uranblei $\left(\overset{206,0}{Pb}\right)$ und von gewöhnlichem Blei $\left(\overset{207,2}{Pb}\right)$ vorstellen, läßt sich folgendermaßen stützen. In verschiedenen geologisch gleich alten Uranmineralien ist das Uran zu gleichem Bruchteil in Uranblei umgewandelt, so daß das Mengenverhältnis $\overset{206,0}{Pb}/U$ in solchen Mineralien gleich sein muß. Enthalten jedoch die Mineralien außer dem radioaktiv entstandenen Uranblei auch wechselnde Mengen gewöhnlichen Bleies, so muß dem Anwachsen des A G. des aus ihnen isolierten Bleies auch eine Erhöhung des Mengenverhältnisses **Pb**/U parallel laufen. Daß dies in der Tat sowohl in qualitativer als auch annähernd in quantitativer Hinsicht zutrifft, hat der Verfasser für drei von derselben Fundstätte (Joachimstal) stammende Bleiproben mit dem A. G. 206,40, 206,60 und 206,71 gezeigt, wobei als Maß des Verhältnisses **Pb**/U die im eindeutigen Zusammenhang damit stehende, von dem Bleiisotopen RaD herrührende β-Strahlenaktivität der Bleipräparate diente. Solche Bleiarten sind also, obwohl ihre direkte Zerlegung noch nicht möglich war, als Gemische zu betrachten, und man sollte deshalb nicht von ihren Atomgewichten sprechen, da es keine besonderen Atome mit dem A. G. 206,6 gibt. Wir werden deshalb in allen Fällen, wo das mittlere Atomgewicht eines Isotopengemisches gemeint wird, den Ausdruck Verbindungsgewicht (25) (V. G.) gebrauchen (22).

3. Thoriumblei.

Die Prüfung der oben erwähnten Forderung der Verschiebungssätze, daß das radioaktiv nicht mehr nachweisbare Thorium D eine Bleiart mit dem A. G. 208 sei, stieß auf größere Schwierigkeiten, als die Aufklärung der Frage des Uranbleies. Dies rührt in erster Linie daher, daß alle bekannten Thormineralien einen gewissen Urangehalt aufweisen; deshalb stellt das im Laufe geologischer Zeiten in solchen Mineralien entstehende Blei ein Gemisch von Uranblei $\left(\overset{206,0}{Pb}\right)$ und Thoriumblei $\left(\overset{208,1}{Pb}\right)$ vor und muß aus diesem

Grunde ein mittleres, von dem Mischungsverhältnis abhängiges Verbindungsgewicht besitzen. Da weiterhin das Uran schneller zerfällt als das Thorium, wird sich im Mineral relativ mehr Uranblei als Thorblei ansammeln. Dabei ist zu bedenken, daß einwandfreie Anhaltspunkte für die Existenz des Thorbleies nur dann zu gewinnen sind, wenn das resultierende mittlere V. G. den Wert des A. G. des gewöhnlichen Bleies (207,2) deutlich übersteigt. Für die Untersuchung der Frage des Thorbleies war es deshalb erforderlich, Mineralien zu wählen, in denen das Mengenverhältnis Thor/Uran besonders hoch ist.

Den ersten sicheren Beweis für die Existenz des Thorbleies lieferten Atomgewichtsbestimmungen an Blei, das von Soddy aus einem Thorit von Ceylon isoliert worden ist. Die Analyse des Minerals ergab 57 Proz. Thor, 1,03 Proz. Uran und 0,4 Proz. Blei. Das Gewichtsverhältnis Thor/Uran beträgt somit 55. Die von Soddy und seinen Mitarbeitern nach verschiedenen Methoden ausgeführten Bestimmungen des A. G. lieferten Zahlen, die wesentlich höher als das A. G. des gewöhnlichen Bleies lagen, der genaue, von Hönigschmid ermittelte Wert des V. G. des Bleies aus dem betreffenden Thorit beträgt 207,77.

Ein noch günstigeres Gewichtsverhältnis Th/U = 67 wies ein vom Verfasser besonders ausgesuchter Thorit aus Norwegen auf, dessen Analyse 30,1 Proz. Thor, 0,45 Proz. Uran und 0,35 Proz. Blei ergab. Hönigschmid bestimmte das V. G. des aus diesem Thorit vom Verfasser abgeschiedenen Bleies und erhielt den bis jetzt für Blei höchsten Wert 207,90. Da diese Bleiart noch eine gewisse Menge Uranblei enthalten muß, läßt sich leicht berechnen, daß das A. G. des Thoriumbleies (ThD) mindestens 207,97 beträgt, was nahe mit dem theoretischen, aus dem A. G. des Thors (232,12) für Thorium D in bekannter Weise sich ergebenden[1]) Wert 208,08 übereinstimmt.

Es sei noch erwähnt, daß man eine Zeitlang aus gewissen, hier nicht näher zu erläuternden Gründen das Thorium D für ein unbeständiges Element gehalten hat, und daß auch jetzt noch die Frage nicht ganz entschieden ist, ob das Thorium D bzw. seine

[1]) Nach Abzug von 6 × 4,00 für 6 α-Teilchen und 0,04 für die Massenveränderung infolge Energieabgabe.

beiden Komponenten vollkommen stabil sind. Die Möglichkeit, das Thoriumblei in wägbaren Mengen aus den Mineralien zu gewinnen, läßt jedoch folgern, daß, wenn das als einheitliches Element betrachtete Thorium D eine weitere Umwandlung erleiden sollte, seine Halbwertszeit nicht unter 170 Millionen Jahre liegen kann (26).

4. Gewöhnliches Blei.

Aus einem Thorianit aus Ceylon, der 68,9 Proz. Thor und 11,0 Proz. Uran enthielt, hat Hönigschmid (26) eine Bleiart isoliert, die offenbar ein Gemisch von Thorblei und Uranblei vorstellt, deren V. G. (207,2) jedoch genau mit dem A. G. des gewöhnlichen Bleies übereinstimmt. Dieses Thorianitblei verrät zurzeit noch seinen radioaktiven Ursprung, da es die Aktivität des zusammen mit ihm aus dem Mineral abgeschiedenen Bleiisotopen Radium D aufweist. In etwa 200 Jahren aber, nachdem das Ra D, dessen Halbwertszeit ja nur 16 Jahre beträgt, praktisch vollständig abgefallen sein wird, könnte man mit den heutigen qualitativen und quantitativen chemischen Methoden dieses Blei in keiner Weise von gewöhnlichem Blei unterscheiden, und man muß sich deshalb die Frage vorlegen, ob letzteres nicht etwa ein solches Gemisch von Thorblei und Uranblei vorstellt. Der wichtige Befund von G. P. Baxter und F. L. Grover (23), daß die von ihnen untersuchten sieben Proben gewöhnlichen Bleies sehr verschiedenen mineralogischen und geographischen Ursprungs innerhalb der Versuchsfehler dasselbe A. G. zeigten, würde allerdings beweisen, daß, wenn das gewöhnliche Blei ein Gemisch wäre, seine Zusammensetzung allerorts die gleiche sein müßte. Dies wäre übrigens nicht so verwunderlich, wie es auf den ersten Blick scheinen könnte: da sowohl Uran wie Thor vor der Erstarrung der Erdkruste existiert haben müssen, waren auch Uranblei und Thorblei im Schmelzfluß vorhanden, und es wäre ja nur die Annahme ihrer gleichmäßigen Vermischung notwendig, um die Konstanz des A. G. des gewöhnlichen Bleies zu erklären.

Wenn aber auch gegen die Hypothese der zusammengesetzten Natur des gewöhnlichen Bleies kein entscheidender Einwand sich vorbringen läßt, so spricht auch nichts überzeugend für sie, und man muß deshalb zurzeit das gewöhnliche Blei als ein be-

sonderes Element neben dem Uranblei und Thorblei betrachten. Wir hätten somit in der Bleiplejade drei in wägbaren Mengen zugängliche Elemente:

$$\overset{206,0}{\mathrm{Pb}},\quad \overset{207,2}{\mathrm{Pb}} \text{ und } \overset{208,0}{\mathrm{Pb}}.$$

VII. Die Eigenschaften isotoper Elemente.

Die Isolierung der isotopen Bleiarten in größeren Mengen (27) hat es zum ersten Male ermöglicht, die Eigenschaften der Isotopen direkt zu vergleichen, und, wie es ja nicht anders zu erwarten war, erwiesen sich diese Elemente in bezug auf eine Reihe von Eigenschaften als außerordentlich ähnlich. Von großer Wichtigkeit ist vor allem der Nachweis, daß die Isotopen in ihrem ganzen qualitativ-analytisch-chemischen Verhalten völlig und in bezug auf das optische Spektrum weitgehend übereinstimmen. Nicht nur ist der allgemeine Bau des ganzen Spektrums bei verschiedenen Bleiarten identisch, sondern auch die Wellenlänge der entsprechenden Linien ist praktisch gleich. Es ist zwar W. D. Harkins und L. Aronberg gelungen, bei der Spektrallinie 405,8 $\mu\mu$[1]) zwischen $\overset{207,2}{\mathrm{Pb}}$ und $\overset{206,0}{\mathrm{Pb}}$ den theoretisch höchst bemerkenswerten Unterschied von 0,00043 $\mu\mu$ festzustellen, doch beträgt er nur ein Millionstel des Absolutwertes (39a).

In vielen anderen Eigenschaften konnte man bis jetzt überhaupt keinen Unterschied zwischen den Bleiarten feststellen; das gilt z. B. für das elektrochemische Potential, für Flüchtigkeit, Schmelzpunkt (29), magnetische Suszeptibilität, Brechungsindex der Salzlösungen, Diffusionsgeschwindigkeit in Lösungen usw. Diese Übereinstimmung gilt aber durchaus nicht für alle Eigenschaften. Da das Atomgewicht verschieden ist, müssen die Isotopen auch in denjenigen Eigenschaften, die direkt von der Masse abhängen, Unterschiede aufweisen. Dazu gehört vor allem die Dichte in festem Zustande.

---

[1]) $1\ \mu\mu = \frac{1}{1000000}$ mm

Th. W. Richards und Ch. Wadsworth bestimmten für verschiedene Bleiarten einerseits das A. G., andererseits die Dichte (bei 19,94^0). Dividiert man das A. G. durch die zugehörige Dichte, so erhält man das Atomvolumen, d. h. das Volumen eines Grammatoms.

Tabelle 8.

Atomgewicht der Bleiart	206,085	206,34	207,20
Dichte	11,273	11,288	11,337
Atomvolumen	18,281	18,280	18,276

Die Resultate sind in der obigen kleinen Tabelle angegeben, und man sieht, daß die Werte für das Atomvolumen der drei Bleiarten innerhalb der Versuchsfehler übereinstimmen, woraus man schließen kann, daß auch die Radien der einzelnen Atome der Isotopen gleich groß sind. Die Dichten der Isotopen sind aber verschieden, und zwar den Atomgewichten direkt proportional, wodurch die Dichtebestimmung zur Ermittelung der relativen Atomgewichte der Isotopen dienen kann.

Ein anderes Beispiel dieser Art bietet die Betrachtung gesättigter Lösungen der Nitrate isotoper Bleiarten. Die Gleichheit der Löslichkeit der Salze der Isotopen, die aus der Untrennbarkeit durch fraktionierte Kristallisation folgt, bedeutet, daß in gleichen Volumina der gesättigten Lösungen einander entsprechender Salze die gleiche Zahl der Moleküle enthalten sein muß, d. h. die molare Löslichkeit ist gleich. Da aber die Molekulargewichte der Nitrate zweier Bleiarten infolge der Verschiedenheit der Atomgewichte des Metalles verschieden sind, wird auch das Gewicht gleicher Volumina der gesättigten Lösungen, d. h. die Dichte der Lösungen, verschieden sein müssen. Dies wurde vom Verfasser und M. Lembert nachgewiesen: für das Gewicht von 10 ccm der bei 24,45^0 gesättigten Lösungen der Nitrate von $\overset{207,20}{\text{Pb}}$ und $\overset{206,59}{\text{Pb}}$ erhielten sie 14,4450 und 14,4359 g. Aus diesen Versuchen konnte gefolgert werden, daß die molaren Löslichkeiten dieser zwei verschiedenen Bleinitrate bis auf $^7/_{100}$ Promille ihres Absolutwertes übereinstimmen. Letzteres wurde von Richards und W. C. Schumb mit etwas geringerer Genauigkeit auch durch direkte Analyse bestätigt: sie fanden für den Gehalt der bei 25,00^0 gesättigten Lösungen der Nitrate

von $\overset{207,19}{Pb}$ bzw. $\overset{206,34}{Pb}$ die innerhalb der Versuchsfehler übereinstimmenden Werte

$$1{,}7993 \text{ bzw. } 1{,}7989 \text{ Mole}^{1)} \; Pb(NO_3)_2$$

pro 1000 g Wasser. Die in Grammen ausgedrückte Löslichkeit ist aber natürlich verschieden und beträgt für die letztgenannten Lösungen pro 1000 g Wasser

$$595{,}95 \text{ g } \overset{207,19}{Pb}(NO_3)_2 \text{ bzw. } 594{,}28 \text{ g } \overset{206,34}{Pb}(NO_3)_2.$$

Die Bestimmung der Dichte gesättigter Lösungen bietet ebenfalls eine sehr einfache Methode zur Ermittelung relativer Atomgewichte der Isotopen.

Wir müssen also bei Isotopen zwei Gruppen von Eigenschaften unterscheiden: die einen, wie das qualitativ chemische und spektroskopische Verhalten, die molare Löslichkeit der Salze, das elektrochemische Normalpotential, das Atomvolumen und sehr wahrscheinlich noch viele andere Eigenschaften sind bis zu einem sehr hohen Grade der Annäherung für alle Glieder einer Plejade, für den ganzen Bleitypus oder Thoriumtypus gleich. Man kann sie deshalb als Plejadeneigenschaften, T y p u s e i g e n s c h a f t e n oder auch als kolligative Eigenschaften der Isotopen bezeichnen. Auf der anderen Seite haben wir das Atomgewicht und dadurch das ganze Verhalten in der quantitativen Analyse, das radioaktive Verhalten, die Dichte in allen Aggregatzuständen, die in Gramm/Liter ausgedrückte Löslichkeit usw., die für jedes Glied einer Plejade und für jedes Gemisch der Isotopen, für jede B l e i a r t, einen anderen Wert haben. Dies sind die A r t e i g e n s c h a f t e n. Auf Grund der Arteigenschaften ist also eine feinere Differenzierung der Materie möglich, als nur auf Grund der Typuseigenschaften (28).

Allerdings zeigten Betrachtungen, die vom Verfasser auf Grund des im Kap. XII behandelten Atommodells und der modernen Theorie fester Körper angestellt wurden (29), daß Isotope mit verschiedenem A.-G. sich in allen Eigenschaften mit Ausnahme der Kernladung (vgl. Kap. XII, 2) bis zu einem gewissen, wenn auch vielfach nur sehr geringen Grade unterscheiden müssen. Da-

---

[1]) Unter einem Mol versteht man die dem Molekulargewicht gleiche Anzahl Gramme.

nach ist es nur eine Frage der Meßgenauigkeit, ob man den Unterschied nachweisen kann oder nicht, und es existiert somit keine scharfe Grenze zwischen den „Typuseigenschaften“ und den „Arteigenschaften“. Da aber zur Feststellung eines Unterschieds, z. B. im Falle des Spektrums (Typuseigenschaft) eine ganz bedeutend größere Meßgenauigkeit erforderlich ist als z. B. im Falle der Dichte (Arteigenschaft), ist für praktische Zwecke eine derartige Einteilung der Eigenschaften berechtigt und erwünscht.

VIII. Chemisches Verhalten der Stoffe in äußersten Verdünnungen.

Der Nachweis, daß isotope Elemente in einer großen Reihe von Eigenschaften ein so weitgehend übereinstimmendes Verhalten zeigen, hat es ermöglicht, ein neues Forschungsgebiet von nicht geringem Reiz, nämlich die Untersuchung des physikalischen und chemischen Verhaltens der Materie in außerordentlich dünnen Schichten und höchsten Verdünnungen aufzunehmen. Zwar sind schon vor der Aufstellung der Isotopentheorie viele Erfahrungen über das Verhalten von kurzlebigen, in winzigen Mengen vorhandenen Radioelementen gesammelt worden, doch konnte man aus solchen Beobachtungen wenig Folgerungen allgemeiner Natur ziehen: da ja der chemische Charakter der betreffenden Radioelemente nicht näher bekannt war, mußte es, wie bereits auf S. 32 erwähnt wurde, unentschieden bleiben, was in ihrem Verhalten der kleinen Konzentration und was dem unbekannten Chemismus zuzuschreiben war. Nachdem wir aber erfahren haben, daß z. B. Thorium B, das in Mengen von einem Billionstel ($^1/_{10^{12}}$) Milligramm radioaktiv noch bequem nachgewiesen werden kann, ein Glied der Bleiplejade ist, können wir aus seinem Verhalten schließen, welche Eigenschaften gewöhnliches Blei in so großen Verdünnungen zeigen würde. Dadurch wird das der Untersuchung zugängliche Konzentrationsgebiet sehr erweitert.

Von den nach diesen Richtungen bereits vorliegenden Erfahrungen, die die Verdampfung der Radioelemente (30), ihre elektrochemischen Eigenschaften (31), sowie ihr Vorkommen im kolloidalen

Zustand (32) und besonders die Fällung und Adsorption der Radioelemente betreffen, sei hier nur auf die letzteren Erscheinungen etwas näher eingegangen, weil deren Studium zu Resultaten geführt hat, die in mehrfacher Hinsicht ein nicht geringes Interesse beanspruchen (33).

Kurz nach der Einreihung der Radioelemente in das periodische System konnten der Verfasser und P. Beer auf Grund der zahlreichen älteren und eigenen neuen Beobachtungen folgende Regel aufstellen: ein Radioelement fällt aus äußerst verdünnten Lösungen mit den verschiedensten Niederschlägen aus, wenn diese unter Bedingungen gefällt werden, unter denen das betreffende Radioelement, wenn es in wägbaren Quantitäten zugegen wäre, ein schwer lösliches Salz bilden würde. Dann fanden der Verfasser und F. Richter bei näherer Untersuchung des Thorium B, eines Gliedes der Bleiplejade, daß es mit Wismutsulfid, Mangancarbonat oder Bariumsulfat praktisch vollständig, mit Silberjodid und Silberchlorid nur teilweise, mit Nitronnitrat jedoch fast gar nicht aus einer Lösung ausgefällt wird. Nun sind das Sulfid, Carbonat und Sulfat des Bleies schwer löslich, sein Nitrat ist ein sehr leicht lösliches Salz, während das Bleijodid und Bleichlorid eine Mittelstellung einnehmen. Es besteht also ein ausgesprochener Parallelismus zwischen der Fällbarkeit eines Radioelementes mit verschiedenen Niederschlägen einerseits und der Löslichkeit der Verbindung des Radioelementes mit den fällenden Säureresten (Anionen) andererseits.

Wie ersichtlich, berechtigt diese auf den ersten Blick fast selbstverständlich scheinende Regel, aus dem Verhalten eines Radioelementes bei Fällungsreaktionen anderer Elemente die wahre chemische Natur des ersteren zu folgern. Das wurde zwar von manchen Forschern bereits vor der Formulierung der Regel, z. B. bei der Ermittelung der chemischen Natur und der Stellung im periodischen System von Actinium und Polonium, die keine in wägbaren Mengen zugänglichen Isotope besitzen, getan, andere Autoren haben jedoch die Berechtigung solcher Schlüsse in Frage gestellt. Die Fällungsregel läßt aber keine Zweifel mehr übrig, daß diese Elemente sowie auch das Uran X_2 und Protactinium im periodischen System richtig untergebracht wurden.

So selbstverständlich die Fällungsregel scheinbar ist, so überraschend sind in Wirklichkeit die Konsequenzen, zu denen sie geführt hat. Thorium B fällt nämlich z. B. mit Wismutsulfid durchaus nicht deshalb aus, weil unter den Bedingungen der Fällung die Sättigungskonzentration des schwerlöslichen Sulfids des Th B (des Bleisulfids) etwa überschritten wäre. Denn es konnte gezeigt werden, daß eine Ausfällung eines Radioelementes erfolgen kann, selbst wenn seine Konzentration eine Billion mal kleiner ist, als zur Erreichung der Sättigung nötig ist. Auch der Isomorphismus zwischen dem Niederschlag und dem mitgefällten radioaktiven Salz ließ sich nicht für alle Beobachtungen als genügende Erklärung heranziehen. So blieb die Annahme übrig, daß hier die Erscheinung der Adsorption der Radioelemente an der Oberfläche des ausfallenden Salzes eine Rolle spielen müsse.

Die Fällungsregel und einige eigene interessante Beobachtungen über das Kolloidwerden von Radioelementen veranlaßten deshalb F. Paneth (gemeinsam mit K. Horovitz), die Adsorption der Radioelemente durch verschiedene Stoffe zu studieren, und er gelangte in der Tat zu einer der Fällungsregel analogen Adsorptionsregel. Sie besagt, daß jene Radioelemente gut adsorbiert werden, deren Verbindung mit dem elektronegativen Bestandteil (Säurerest) des adsorbierenden festen Stoffes in dem betreffenden Lösungsmittel schwer löslich ist. So wird z. B. das Th B beim Schütteln mit Bariumsulfatpulver weitgehend aus seiner Lösung entfernt. Die Fällungsregel läßt sich somit auf die Adsorptionsregel zurückführen. Diese geht aber weiter als jene. Während nämlich die von Fajans und Beer formulierte Fällungsregel zunächst unentschieden ließ, ob der elektronegative Bestandteil, welcher mit dem Radioelement die schwerlösliche Verbindung bildet, in der Lösung oder im Niederschlag enthalten sein muß, damit Fällung erfolgen kann [1]), ist nach der Panethschen Adsorptionsregel in erster Linie die chemische Zusammensetzung des adsorbierenden Niederschlages und nicht die der Lösung ausschlaggebend. Die Richtigkeit dieser Auffassung konnte auch für die Fällungserscheinungen gezeigt werden: Nitron-

[1]) Bei den allermeisten Fällungen trifft nämlich beides zu.

nitrat fällt kein Th B aus, auch wenn Ammonsulfat in der Lösung enthalten ist; damit Adsorption und Ausfällung erfolgt, genügt es also nicht, daß die Sulfatgruppe in der Lösung zugegen ist, sondern sie muß dazu, wie beim Bariumsulfat, im Niederschlag enthalten sein.

Die Panethsche Adsorptionsregel ist noch aus dem Grunde besonders bemerkenswert, weil sie im nahen Zusammenhange mit den neuen Vorstellungen über die Struktur der Kristalle und über die Kräfte, die an deren Oberfläche herrschen, steht. Durch das nähere Studium der Fällung und Adsorption der Radioelemente ist eine weitere Förderung dieser Vorstellungen zu erhoffen.

IX. Radioelemente als Indikatoren.

Während die im vorhergehenden Abschnitt behandelten Probleme nur mit Hilfe von Radioelementen untersucht werden können, gibt es eine Anzahl von Fragen der allgemeinen Chemie, für deren Bearbeitung die Heranziehung der radioaktiven Isotopen zwar nicht unbedingt erforderlich ist, aber doch sehr wesentliche Vorteile bietet, wie aus folgenden zwei Beispielen hervorgeht.

Die Bestimmung der Löslichkeit sehr schwer löslicher Salze, wie z. B. des Bleichromats ist mit den gewöhnlichen analytischen Methoden nicht möglich und ließ sich selbst durch Ermittelung der elektrischen Leitfähigkeit der gesättigten Lösung nur schätzungsweise ausführen. Durch Anwendung der Tatsache, daß Radium D (bzw. Thorium B) vom Blei durch keine chemische Operation trennbar ist, konnten aber G. v. Hevesy, F. Paneth und Elisabeth Róna (34) folgendermaßen die Löslichkeit des Bleichromats ermitteln. Aus einer Lösung, die neben einer bekannten Gewichtsmenge von Blei eine elektroskopisch gemessene Quantität von Radium D enthielt, wurde das Isotopengemisch als Chromat ausgefällt. Den erhaltenen Niederschlag, der ein das Chromat des Ra D als Indikator enthaltendes Bleichromat vorstellte, hat man mit Wasser bis zur Erreichung der Sättigung geschüttelt und dann wurde die gesättigte Lösung, die nur kaum wägbare Spuren von Bleichromat enthielt, auf ihren Gehalt an Ra D radioaktiv unter-

sucht. Da wegen der Untrennbarkeit der Isotopen das Verhältnis der Mengen des Ra D und des Bleies in der ursprünglichen und in der an Bleichromat gesättigten Lösung das gleiche sein muß, konnte leicht der Bleigehalt der letzteren, also die Löslichkeit des Bleichromats berechnet werden. Sie ergab sich zu etwa 2×10^{-7} Mol/Liter.

Dieses Prinzip empfiehlt sich für ähnliche Probleme nicht nur deshalb, weil die absoluten radioaktiv bestimmbaren Mengen der Radioelemente so außerordentlich klein sind, sondern auch aus dem Grunde, weil die auf die Messung der Intensität der Ionisationsströme zurückführbaren radioaktiven Analysenmethoden eine außerordentlich weite Skala umfassen: so läßt sich vom Radium 1 g ebenso sicher erkennen und messen wie $^1/_{100000}$ Milligramm.

Dieser Umstand ermöglichte F. Paneth, auf radioaktivem Wege den Nachweis der Existenz des seit langem gesuchten Wismutwasserstoffes zu erbringen. Er sammelte den aktiven Niederschlag der Thoriumemanation auf Magnesiumblechen und löste die so erhaltene Legierung von Thorium B (Bleiart) und Thorium C (Wismutart) mit dem Magnesium in verdünnten Säuren. Paneth zeigte, daß aus diesem Reaktionsgemisch neben Wasserstoff auch ein radioaktives Gas entweicht, dessen Aktivität in einem für die Untersuchung von Emanationen bestimmten Elektroskop mit der Halbwertszeit des Thorium C (1 Stunde) abfiel. Das neue Gas konnte nur als die Wasserstoffverbindung des Th C angesehen werden, wodurch bewiesen wurde, daß ein Element des Wismuttypus sich mit Wasserstoff (wohl zu BiH_3) verbindet. Die in Form der Wasserstoffverbindung erhaltene Menge des Th C betrug nur 1 bis 2 Tausendstel der auf dem Magnesiumblech befindlichen Th C-Menge; diese schlechte Ausbeute erklärte zum Teil die bisherigen Schwierigkeiten, den Wismutwasserstoff in wägbaren Mengen zu erhalten. Nachdem aber durch die radioaktive Methode die besten Darstellungsbedingungen und die Eigenschaften der Wasserstoffverbindung des Wismuttypus ausfindig gemacht wurden, gelang es Paneth und E. Winternitz, auch aus gewöhnlichem Wismut seine gasförmige Wasserstoffverbindung in wägbaren Mengen darzustellen (35).

X. Isotopie bei gewöhnlichen Elementen.

In einem der vorhergehenden Kapitel wurde erwähnt, daß das gewöhnliche Blei vielleicht ein Gemisch von Uranblei und Thorblei vorstellt. Die Tatsache, daß das gewöhnliche Blei in chemischer Hinsicht sich wie ein einheitliches Element verhält, widerspricht einer solchen Hypothese durchaus nicht, denn ein Isotopengemisch ist ja durch die üblichen chemischen Trennungsmethoden unzerlegbar. Aus demselben Grunde wäre es möglich, daß auch viele der übrigen heute als Elemente geltenden Stoffe in Wirklichkeit Gemische von Isotopen sind, und diese Annahme ist besonders verlockend, wenn man an die S. 8 erwähnten Schwierigkeiten erinnert, auf die die Durchführung der Proutschen Hypothese stößt. Die Erscheinungen des radioaktiven Zerfalls haben ja gezeigt, daß das Helium einen Bestandteil der radioaktiven Atome bildet. Das scheint auch für leichtere Elemente zu gelten: in den zwei Reihen von Elementen Li, B, (N), F, Na, Al, P und He, (Be), C, Ne, Mg, Si, S entspricht, ähnlich wie bei α-Umwandlungen, einer Verschiebung um zwei Gruppen des periodischen Systems eine Veränderung des Atomgewichtes um vier Einheiten. Aber auch der Wasserstoff beteiligt sich wohl am Aufbau anderer Atome (36). Es liegt also nahe, wieder auf die Proutsche Hypothese zurückzugreifen und zu versuchen, die Atomgewichte aller Elemente als Summe ganzer Vielfache der A. G. des Wasserstoffes (1,008) und des Heliums (4,00) darzustellen. Bei einer Anzahl von Elementen, zu denen besonders Magnesium (A. G. 24,32) und Chlor (A. G. 35,45) gehören, scheitert jedoch eine derartige Berechnung vollkommen. Es drängte sich deshalb die Frage auf, ob die erwähnten Stoffe nicht etwa Gemische von Isotopen vorstellen, deren Atomgewichte sich durch die Formel $m \times 1{,}008 + n \times 4{,}00$ ausdrücken lassen[1]).

Diese Hypothese ist der experimentellen Prüfung zugänglich, denn wenn auch ein Isotopengemisch durch die gewöhnlichen chemischen und viele physikalischen Mittel unzerlegbar ist, muß

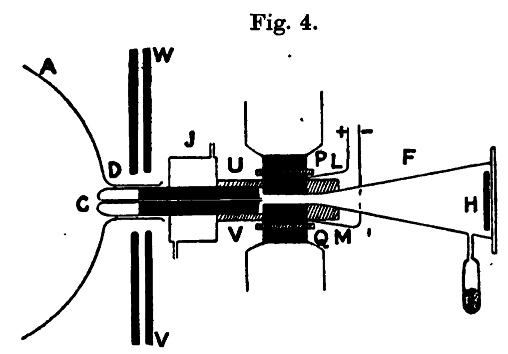
[1]) m und n sind ganze Zahlen.

seine Zerlegung gelingen, sobald man Trennungsmethoden anwendet, welche sich auf die Verschiedenheit der Masse der Isotopen stützen.

Vor allem wäre hier die Diffusion im Gaszustande zu nennen, deren Geschwindigkeit bei gegebener Temperatur bekanntlich nur vom Molekulargewicht des Gases abhängt und deshalb bei fraktionierter Durchführung zu einer teilweisen Trennung der Isotopen benutzt werden könnte. Weiterhin sei hier auf die höchst interessante Methode der elektro-magnetischen Analyse der Kanalstrahlen eingegangen.

Unter Kanalstrahlen oder auch positiven Strahlen versteht man positiv geladene Gasteilchen, die in evakuierten Entladungsröhren (*A* in Fig. 4) mit großen Geschwindigkeiten zur negativen Elektrode (Kathode *C*), also in einer der Bewegung der Kathodenstrahlen entgegengesetzten Richtung fliegen und durch einen Kanal in der Kathode hinter diese gelangen können. Wenn diese Kanalstrahlenteilchen auf ihrem weiteren Wege ein elektrisches (*L*, *M*) und magnetisches (*P*, *Q*) Feld passieren, so erleiden sie Ablenkungen von ihrer geradlinigen Bahn, deren von dem Verhältnis der Ladung (*E*) zur Masse (*m*) dieser Teilchen und von ihrer Geschwindigkeit abhängende Größe auf einer senkrecht zur ursprünglichen Flugrichtung der Strahlen aufgestellten photographischen Platte (*H*) gemessen werden kann. Bei entsprechender gegenseitiger Stellung der beiden Felder bekommt man auf diese Weise auf der Platte eine Reihe von Parabeln, von denen jede Spuren von Teilchen vereinigt, die ein bestimmtes E/m und verschiedene Geschwindigkeiten besitzen. Da man, wie Sir J. J. Thomson zeigte, aus der Entfernung des Anfangs der Parabeln von der Spur der ursprünglichen Strahlenrichtung (runder Fleck in der Fig. 5) auf der Platte in vielen

Fig. 4.



Apparat zur Erzeugung von Kanalstrahlen nach J. J. Thomson.

Fällen die Ladung E (sie entspricht ganzen Vielfachen des elektrischen Elementarquantums) ermitteln kann, erlaubt diese Methode dann das m, also die Masse der im Gase enthaltenen Teilchen, zu bestimmen. Die Fig. 5 zeigt z. B. eine Platte, die von Thomson bei der Untersuchung eines Gemisches der leichteren Edelgase der Atmosphäre erhalten wurde.

Nun haben die Isotopen verschiedene Massen m, müssen also getrennte Parabeln ergeben, wodurch nicht nur ihr Nachweis, sondern prinzipiell auch eine Trennung möglich ist.

Fig. 5.



Kanalstrahlen in einem Gemisch der leichteren Edelgase der Atmosphäre nach J. J. Thomson.

Diese Methode hat bereits einige für unser Problem überaus wichtige Resultate ergeben. Auf der abgebildeten Platte fand Thomson, daß neben der normalen Parabel, die Neon mit dem A. G. 20 entspricht, sich auch eine schwächere befindet, die einem Gas mit dem A. G. 22 zukommen muß, das Metaneon genannt wurde. F. W. Aston versuchte das Metaneon von Neon auch auf anderen Wegen abzutrennen. Alle chemischen Methoden und auch fraktionierte Verdampfung versagten völlig, und nur bei Anwendung des vorher erwähnten Mittels — der fraktionierten Diffusion — haben Dichtebestimmungen die Andeutung einer Trennung ergeben, die aber dann von Aston selbst als nicht ganz sicher angesehen wurde. Neuerdings hat aber Aston, wie er in einer kurzen Notiz berichtet, die Kanalstrahlenanalyse so weit verfeinert, daß er mit Sicherheit feststellen konnte, daß das gewöhnliche Neon der Luft, dessen V. G. 20,2 ist, ein Gemisch zweier isotoper Elemente vorstellt, deren Atomgewichte mit einer Genauigkeit von 1 Prom. zu 20,00 und 22,00 angegeben werden.

Von hervorragendem Interesse ist weiterhin das von Aston mit seiner verfeinerten Methode erhaltene Resultat, daß das oben wegen seines stark von der Ganzzahligkeit abweichenden A. G. als besonders verdächtig bezeichnete Chlor in der Tat ein Gemisch zweier Elemente mit den A. G. 35 und 37 ist. Eine nähere Beschreibung dieser Versuche steht noch aus, doch spricht für die Astonsche Behauptung überzeugend der Umstand, daß er sowohl für das einfach geladene wie auch für das doppelt geladene Chloratom je zwei Parabeln erhielt, deren Intensität im Verhältnis von etwa drei bis vier zu eins standen. Dasselbe wurde auch für das geladene HCl-Molekül und das geladene Teilchen COCl (bei Verwendung des Phosgens $COCl_2$) festgestellt.

Danach wäre also die für das V. G. des gewöhnlichen Chlors mit so großer Sorgfalt festgestellte Zahl 35,45 nur ein Mittelwert zweier anderer, einen viel tieferen naturwissenschaftlichen Sinn besitzenden Zahlen.

Es erscheint auf den ersten Blick überraschend, daß die beiden elementaren Bestandteile des Chlors bis jetzt stets in dem gleichen Mischungsverhältnis gefunden wurden. Doch handelt es sich hier um ähnliche Verhältnisse wie die beim gewöhnlichen Blei (S. 57) erwähnten: die Genesis der zwei Glieder der Chlorplejade ist uns zwar nicht bekannt, doch unterliegt es keinem Zweifel, daß der überwiegende Teil ihrer auf der Erde befindlichen Mengen in Epochen entstanden ist, die viel weiter zurückliegen als das Festwerden der Erdkruste, so daß die gleichmäßige Vermischung dieser zwei Elemente bereits im Schmelzfluß oder gar im Gaszustande der Erde stattfinden konnte und deshalb durchaus verständlich ist. Nur in den Fällen, wo, wie etwa bei dem Uranblei und Thorblei, Isotope erst nach Erstarren der Erdkruste neu gebildet wurden, kann man ihr getrenntes Auffinden erwarten.

Durch die Astonsche Entdeckung ist eines der stärksten Hindernisse, die seinerzeit die Proutsche Hypothese zu Fall gebracht haben, beseitigt. Sehr bemerkenswert ist es, daß der Unterschied im A. G. sowohl zwischen den zwei Gliedern der Neonplejade wie zwischen denen der Chlorplejade zwei Einheiten beträgt, d. h. gleich dem zwischen den A. G. der isotopen Glieder der Thorium- und Uran-Radiumreihe ist (z. B. Ra Em = 222,

Th Em = 220; Uranblei = 206, Thorblei = 208). Gelegentlich der Einreihung der Radioelemente in das periodische System ist vom Verfasser die Vermutung ausgesprochen worden, daß das Uranblei und Thoriumblei nicht die wirklichen Endprodukte der radioaktiven Reihen, sondern nur ihre ersten Glieder seien, deren weitere Umwandlung zu langsam ist, um mit den radioaktiven Methoden nachweisbar zu sein. Sollten dementsprechend die Reihen durch das ganze periodische System bis zu den leichtesten Elementen durchgehen, so wäre uns ja das „Uranchlor“ und „Thorchlor“ sowie das „Uranneon“ und „Thorneon“ bereits bekannt. Der Vergleich der Atomgewichte lehrt dabei, daß die Glieder der Chlor- und Neonplejade nicht durch lauter Heliumumwandlungen, sondern auch durch mindestens eine „Wasserstoffumwandlung“ verknüpft sein müssen.

Zu erwähnen wäre noch die Mitteilung Astons, nach der auch das Quecksilber ein Gemisch von mindestens 3 oder 4 Isotopen vorstellen soll, deren Atomgewichte jedoch noch nicht angegeben werden. Beim Kohlenstoff und Sauerstoff, deren Atomgewichte gleich 3 × 4,00 und 4 × 4,00 sind, ergab sich keine Andeutung für die Existenz von Isotopen (36).

XI. Die Ordnungszahlen der Elemente.

Durch die Entdeckung der isotopen Elemente, insbesondere durch die erwähnten Atomgewichtsbestimmungen an Blei verschiedenen Ursprungs, ist mit Sicherheit gezeigt worden, daß es Elemente gibt, die bei verschiedenem Atomgewicht außerordentlich ähnliche chemische und spektroskopische Eigenschaften besitzen. Das Atomgewicht bestimmt also nicht, wie man seit der Aufstellung des periodischen Systems dachte, eindeutig die Eigenschaften eines Elementes und kann auch nicht als die einzige Grundlage einer Systematik der Elemente dienen. Zunächst könnte es ja scheinen, daß durch diese Schlüsse der Wert des periodischen Systems zweifelhaft gemacht wird. Die hohe Bedeutung des periodischen Systems bleibt jedoch vollkommen gewahrt, wenn man statt des Atomgewichtes eine andere Eigenschaft der Elemente, nämlich ihre Ordnungszahl, auch Grundzahl genannt,

in den Vordergrund der Betrachtung stellt. Darunter versteht man die Zahl, die man erhält, wenn die Elemente in Reihenfolge ihrer Anordnung im periodischen System numeriert werden, also Wasserstoff = 1, Helium = 2 usw., bis Uran = 92 (vgl. Tabelle 9). Daß dieser Nummer eine tiefere Bedeutung zukommt, und daß man einen vom periodischen System unabhängigen Weg zu ihrer Bestimmung hat, das beweisen vor allem die grundlegenden Messungen der Wellenlänge sogenannter charakteristischer Röntgenstrahlen, die wir in erster Linie H. G. Moseley verdanken.

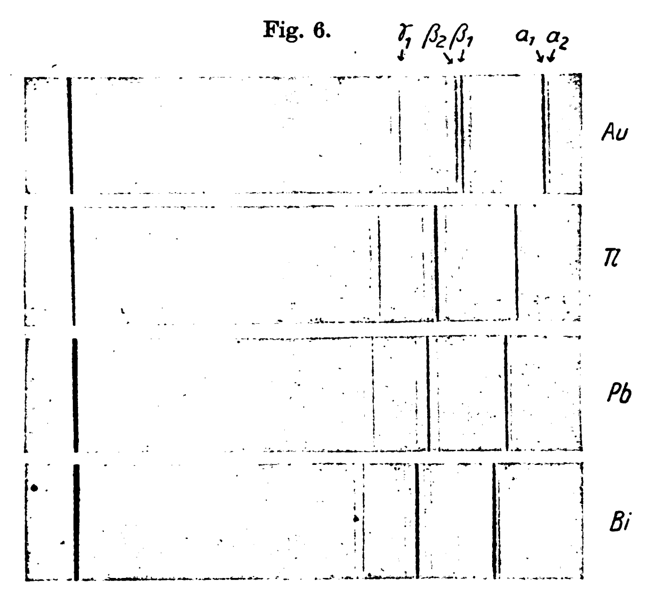
Im Jahre 1912 machten M. v. Laue und seine Mitarbeiter W. Friedrich und P. Knipping die so überaus wichtige Entdeckung, daß Röntgenstrahlen beim Durchgang durch Kristalle Interferenzerscheinungen zeigen. Diese Entdeckung bewies nicht nur endgültig, daß Röntgenstrahlen eine Wellenbewegung vorstellen, sondern sie ermöglichte auch besonders dank den Arbeiten von W. H. und W. L. Bragg die genaue Bestimmung der Wellenlänge der unter verschiedenen Umständen entstehenden Röntgenstrahlen, wobei sich ergab, daß die Wellenlänge dieser Strahlen mit ihrer steigenden Durchdringungsfähigkeit (Härte) fällt.

Aus den Untersuchungen von Ch. G. Barkla war bereits bekannt, daß jedes Element unter dem Einfluß von Röntgen- oder Kathodenstrahlen Röntgenstrahlen von einer für das Element charakteristischen Härte aussendet. Die Härte dieser Strahlen steigt im allgemeinen mit steigendem A. G. des Elementes. Bei Elementen von mittlerem A. G. konnten zwei durch ihre Härte leicht unterscheidbare charakteristische Strahlenarten gefunden werden, die härtere K-Strahlung und die weichere L-Strahlung; dagegen waren bei Elementen mit niedrigem A. G. nur die K-Strahlung, bei solchen mit hohem A. G. nur die L-Strahlung der Untersuchung zugänglich.

Die mit Hilfe der Kristallinterferenzmethode ausgeführten Untersuchungen von Moseley, die dann von M. Siegbahn u. a. wesentlich erweitert wurden, zeigten, daß sich jede solche K- oder L-Strahlung und die von Siegbahn neuerdings bei Elementen mit besonders hohem A. G. aufgefundene noch weichere M-Strahlung in Linienspektren (vgl. Fig. 6) zerlegen läßt, die bei den verschiedensten

Elementen ähnlich gebaut sind. So besteht z. B. die K-Strahlung im allgemeinen aus vier Linien, die nahe beieinander liegende Wellenlängen besitzen, die L-Strahlung aus etwa 12 Linien. Nun hängt die Wellenlänge (λ) der bei den verschiedenen Elementen einander entsprechenden Linien bzw. ihr reziproker Wert, die Schwingungszahl oder Frequenz nach einer von Moseley im Jahre 1913 entdeckten Beziehung in einer äußerst einfachen Weise mit der Ordnungszahl der Elemente zusammen.

Fig. 6.



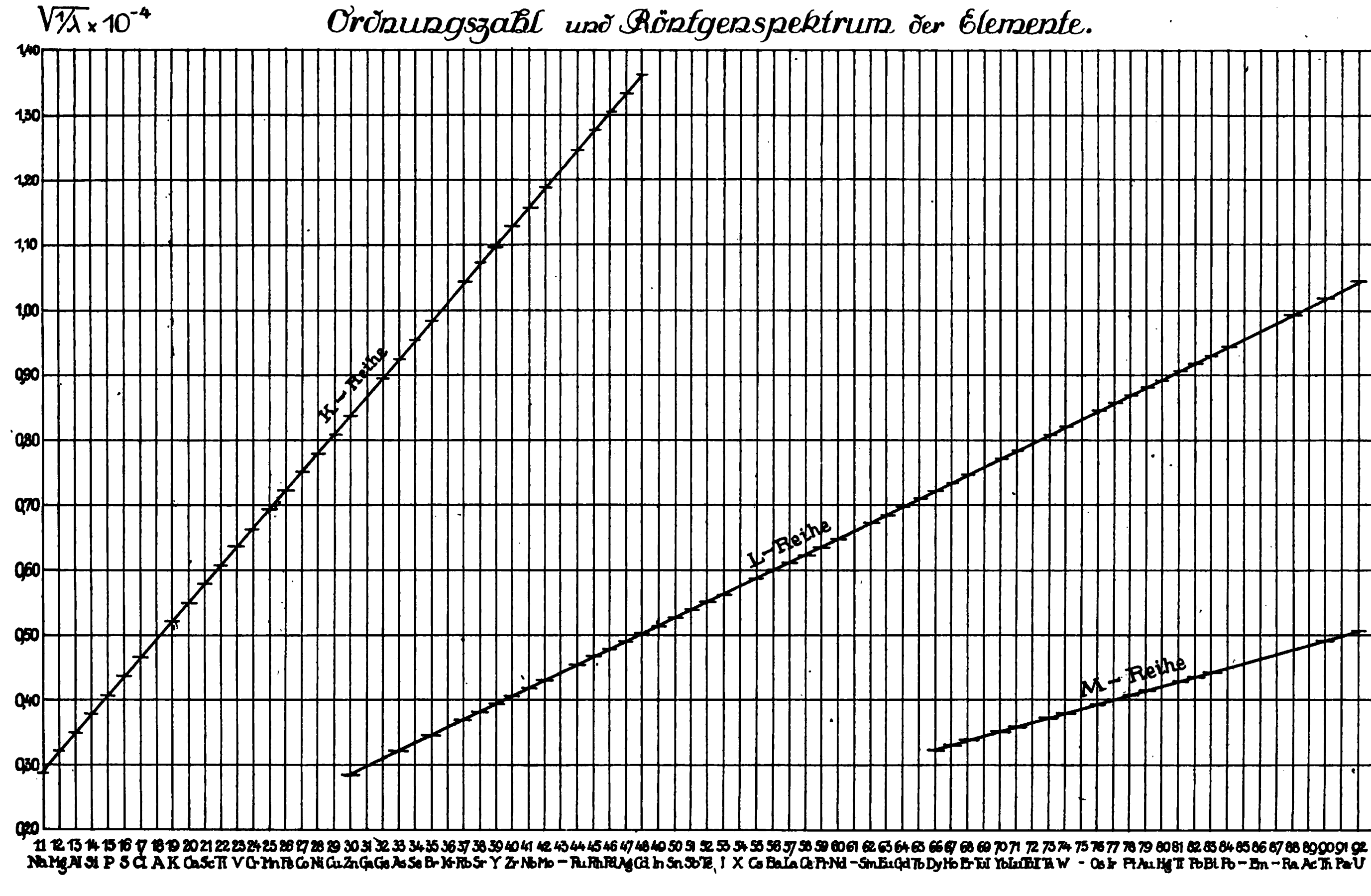
Röntgenspektren der L-Reihe einiger Elemente nach M. Siegbahn.

In der Fig. 7 sind die Elemente in gleichem Abstande voneinander in derselben Reihenfolge wie im periodischen System angeordnet; es ist also ihre Ordnungszahl als Abszisse gewählt, während die Ordinaten die Quadratwurzel aus der Schwingungszahl der analogen Linien vorstellen. Wie ersichtlich, liegen die erhaltenen Punkte, die sich je auf die stärkste Linie der K-, L-[1]) und M-Strahlen beziehen, auf einer annähernd geraden Linie. Zum Atomgewicht zeigt jedoch die Frequenz der charakteristischen Röntgenstrahlen keine einfache Beziehung, und es ist z. B. die Frequenz beim Jod

[1]) α_1 der Fig. 6.

Fig. 7.

Ordnungszahl und Röntgenspektrum der Elemente.



trotz seines kleineren Atomgewichtes (126,92) höher als die beim Tellur (A. G. 127,5) ganz entsprechend der anomalen Reihenfolge, die man diesen Elementen auf Grund ihrer chemischen Eigenschaften im periodischen System zuweisen muß. Dasselbe gilt vom Kobalt und Nickel. Einen weiteren Beweis dafür, daß für die Frequenz der Röntgenstrahlen in erster Linie nicht das A. G., sondern wie für das chemische Verhalten die Stellung im System, d. h. die Ordnungszahl maßgebend ist, ergibt sich aus folgendem. Sir Ernest Rutherford und E. da C. Andrade haben gezeigt, daß die von dem kurzlebigen Glied der Bleiplejade Radium B (A. G. = 214) emittierten γ-Strahlen dieselbe Wellenlänge aufweisen, wie die charakteristischen Röntgenstrahlen des Bleies (A. G. = 207), und nach M. Siegbahn sind auch die Wellenlängen der Röntgenspektren von $\overset{206,0}{\text{Pb}}$ und $\overset{207,2}{\text{Pb}}$ bis auf $^{1}/_{2}$ pro Mille ihres Absolutwertes übereinstimmend.

Das charakteristische Röntgenspektrum ist also ähnlich wie das gewöhnliche optische Spektrum eine Typuseigenschaft, und man wird mit seiner Hilfe die einzelnen Glieder einer Plejade wohl nur bei noch höherer Genauigkeit voneinander unterscheiden können. Zur Erkennung der Ordnungszahl und des mit ihr eindeutig zusammenhängenden chemischen Typus ist aber die Röntgenspektroskopie jetzt schon von hervorragender Bedeutung, und wir werden im Schlußkapitel auf einige für die Lehre von den chemischen Elementen sich aus ihr ergebende wichtige Resultate noch zurückkommen. Zunächst sei aber die sich aufdrängende Frage erörtert, welchen tieferen physikalischen Sinn diese Ordnungszahl besitzt (37).

XII. Struktur der Atome.

Um diese Frage zu beantworten, müssen wir uns dem heute im Mittelpunkte des Interesses stehenden Problem der Struktur der Atome zuwenden, das in den letzten Jahren eine entscheidende Förderung erfahren hat. Es würde einer eigenen Schrift (37, 38) bedürfen, um auch nur die wichtigsten, auf diesem Gebiete bereits erzielten Resultate darzustellen; wir müssen uns deshalb hier auf

dasjenige beschränken, was für unser Thema der Beziehungen zwischen Radioaktivität und der Lehre von den chemischen Elementen erforderlich ist.

Den Ausgangspunkt für die jetzt herrschenden Ansichten über die Struktur der Atome bildet das von Sir Ernest Rutherford vorgeschlagene Atommodell, das er zuerst im Jahre 1911 zur Deutung des Verhaltens von α-Strahlen bei ihrem Durchgang durch Materie (vgl. XIII) herangezogen hat. Dieses Modell wurde dann von Niels Bohr (1913) durch Verknüpfung mit der Planckschen Quantentheorie so glücklich weiter entwickelt, daß es mit einem Schlage zur Grundlage der Theorie der Spektrallinien und vieler anderer Erscheinungen wurde.

1. Allgemeine Vorstellungen.

Das Rutherford-Bohrsche Atommodell führt die Struktur der Atome auf positive und negative Elektrizität zurück. Das Atom eines jeden Elementes besteht danach aus einem positiv geladenen Zentralkern, der von negativen Elektronen umgeben ist. Im neutralen Zustande des Atoms ist die Summe der Ladungen der negativen Elektronen gleich der Ladung des Kernes. Der Kern hat sehr kleine Dimensionen (Radius von der Größenordnung 10^{-12} cm), während die Entfernung der äußersten Elektronen vom Kern dem Atomradius entspricht, also von der Größenordnung 10^{-8} cm ist. Um zu erklären, weshalb die negativen Elektronen trotz der anziehenden Wirkung des positiven Kernes von diesem entfernt bleiben, muß angenommen werden, daß sie um den Kern rotieren. Ein Atom ist somit in gewisser Hinsicht mit einem kleinen Sonnensystem vergleichbar.

In welcher Weise die Elektronen um den Kern angeordnet sind, ist nur bei den einfachsten Atommodellen (Wasserstoff-, Heliumatom) bekannt; man weiß, daß hier die Elektronen kreisförmige oder eliptische Bahnen um den Kern beschreiben. Es unterliegt keinem Zweifel, daß in einem komplizierten Atom seine zahlreichen Elektronen sich nicht alle in gleichem Abstand vom Kern befinden, sondern sich auf mehrere konzentrische Ringe oder, wie neuerdings für wahrscheinlicher gehalten wird, auf mehrere räum-

liche Gebilde, etwa Schalen oder Würfel, deren Ecken sie einnehmen, verteilen.

Die chemischen und viele physikalische Eigenschaften hängen in erster Linie von der Anordnung der äußeren Elektronen des Atoms ab, so z. B. die Valenz eines Metalls von der Zahl derjenigen Elektronen, die leicht von dem Metallatom entfernt werden können (4). . Auch das Zustandekommen des gewöhnlichen Lichtspektrums hängt mit Lagenveränderungen der äußeren Elektronen zusammen, und zwar in der Weise, daß ein Elektron, das unter Energieaufnahme aus seiner normalen Bahn in eine von dem Kern entferntere gebracht wird, beim Zurückkehren in die vorherige Bahn die aufgenommene Energie in Form einer Spektrallinie abgibt. In ähnlicher Weise denkt man sich auch das Entstehen des charakteristischen Röntgenspektrums, nur daß dafür die Lagenveränderungen nicht der äußersten, sondern der dem Kern näher liegenden Elektronen verantwortlich gemacht werden.

An noch tiefere Regionen, nämlich an den Kern selbst, sind die Masse und die radioaktiven Eigenschaften des Atoms geknüpft. Die Masse des negativen Elektrons beträgt nur $^1/_{1830}$ der Masse des Wasserstoffatoms. Nun spricht eine Reihe von Erscheinungen zugunsten der Annahme, daß die Zahl der negativen Elektronen in den Atomen verschiedener Elemente von der Größenordnung ihres Atomgewichtes ist, so z. B. für das Wasserstoffatom eins beträgt. Somit muß der Hauptteil der Atommasse an die positive Elektrizität gebunden sein, d. h. auf Grund des Rutherfordschen Modells an den positiven Kern des Atoms. Die mit einer beträchtlichen Masse behafteten und eine positive Ladung tragenden α-Teilchen müssen danach bei den radioaktiven Umwandlungen aus dem Kern der radioaktiven Atome ausgeschleudert werden. Die Unbeeinflußbarkeit der radioaktiven Vorgänge im Gegensatz zu den chemischen wird vom Standpunkte dieser Vorstellungen verständlich, da sich die letzteren an der Oberfläche, die ersteren tief im Innern der Atome abspielen.

Man nimmt deshalb an, daß auch die negativen Elektronen bei den einer Beeinflussung ebenfalls widerstrebenden β-Umwandlungen von den Kernen der Radioelemente abgegeben werden. Die Kerne, mindestens die mancher radioaktiver Atome,

müssen somit auch negative Elektronen enthalten. Die positive Ladung des Atomkerns wäre danach eine algebraische Summe der den Kern zusammensetzenden positiven und negativen Teilchen (38).

2. Die Kernladung.

Die grundlegende Frage nach der Größe der positiven Ladung von Atomkernen verschiedener Elemente wird durch die zuerst von A. van den Broek (1913) geäußerte Ansicht beantwortet, nach der die positive Kernladung ausgedrückt in elektrischen Elementarquanten gleich ist der Ordnungszahl des Elementes, die sich ja auf Grund des periodischen Systems oder noch eindeutiger aus dem im vorigen Kapitel besprochenen Moseleyschen Gesetz der Röntgenspektren ergibt.

Die Ordnungszahl 1 des Wasserstoffs bedeutet also, daß der Kern des Wasserstoffatoms nur eine positive Ladung trägt, daß also das Wasserstoffatom aus einem positiven Elementarquantum besteht, um das ein negatives Elektron rotiert. Verliert ein Wasserstoffatom dieses negative Elektron, so stellt der zurückbleibende Kern, das einfach geladene positive Wasserstoffion, die kleinste bekannte positive Ladung vor. An diese scheint die Masse des Wasserstoffatoms unzertrennlich gebunden zu sein, denn das Wasserstoffion ist das leichteste positiv geladene Teilchen, das bis jetzt beobachtet werden konnte. Dieses „positive Elektron" hat also eine etwa 1830mal größere Masse als das negative.

An der Richtigkeit der erwähnten Vorstellung über die Struktur des Wasserstoffatoms kann kaum gezweifelt werden, da es Bohr gelungen ist, auf Grund dieser Hypothese unter Heranziehung der Quantentheorie das Zustandekommen des Spektrums des Wasserstoffs weitgehend aufzuklären.

Dem Wasserstoff folgt im periodischen System das Helium mit der Ordnungszahl 2, und es müßte somit nach der van den Broekschen Hypothese sein Atomkern eine doppelte positive Ladung besitzen, was mit der Rutherfordschen Annahme, daß der Heliumkern mit dem α-Teilchen identisch ist, in bestem Einklang steht.

Nicht nur dieser radioaktive Grund spricht für die Annahme, daß das Heliumatom aus einem zweifach positiv geladenen

Kern und zwei negativen Elektronen besteht, sondern in noch höherem Grade die großen Erfolge, die Bohr und A. Sommerfeld mit Hilfe dieses Modells bei der Erklärung selbst der feinsten Details des Heliumspektrums erzielt haben.

Die Ordnungszahl, also auch die Kernladung des Lithiums, soll 3 betragen, die des Berylliums 4 usw. bis zum Uran, dessen Kernladung zu 92 angenommen wird. Für die Richtigkeit des Absolutwertes dieser Zahlen besitzen wir heute noch keine so überzeugenden Gründe wie im Falle von Wasserstoff und Helium, doch werden sie als sehr wahrscheinlich angesehen. Daß aber, entsprechend der van den Broekschen Hypothese, die Kernladung beim Fortschreiten im periodischen System in der Richtung steigender Ordnungszahl von Stelle zu Stelle jeweils um eine Einheit steigt, dafür bürgt die Moseleysche Beziehung zwischen der Ordnungszahl der Elemente und der Wellenlänge der Linien ihrer charakteristischen Röntgenspektren. Denn auf Grund der van den Broekschen Hypothese konnten Moseley und besonders Sommerfeld die für das gewöhnliche Spektrum so gut bewährte Bohrsche Theorie der Spektrallinien auch auf die Röntgenspektren ausdehnen und dabei die Moseleysche Beziehung und den Bau dieser Spektren verständlich machen (39).

3. Erklärung der Verschiebungssätze und der Isotopie.

Eine weitere Stütze für diese Vorstellungen bilden, wie Bohr und Soddy hervorgehoben haben, die radioaktiven Verschiebungssätze und die Existenz der isotopen Elemente. In der Tat, wenn die Verschiebung zur nächstniedrigeren Gruppe des periodischen Systems, d. h. die Erniedrigung der Ordnungszahl um eine Einheit, die positive Kernladung um ein Elementarquantum verkleinert, so muß die Abgabe eines doppelt positiv geladenen α-Teilchens durch den Kern eines radioaktiven Atoms einen Übergang zur zweitniedrigeren Gruppe des periodischen Systems bewirken. Da andererseits der Verlust eines einfach negativ geladenen β-Teilchens die positive Gesamtladung[1]) des Kernes um eine Einheit erhöht,

[1]) Die ja nach S. 77 eine algebraische Summe der positiven und negativen Bestandteile vorstellt.

so wird bei β-Umwandlungen eine Verschiebung zur nächsthöheren Gruppe stattfinden müssen. Diese Folgerungen sind aber mit den Verschiebungssätzen identisch.

Daraus ergibt sich, daß bei der Umwandlung des Radiums, Radioactiniums und Radiothoriums (Tab. 5), bei denen neben der eine normale Verschiebung um zwei Gruppen bewirkenden α-Strahlung noch β-Teilchen auftreten, letztere, falls sie nicht mit einer Verzweigung der Reihe zusammenhängen, nicht aus dem Kern stammen können, sondern aus der äußeren Elektronenhülle durch die primären α-Teilchen herausgeschleudert werden, also eine sekundäre Begleiterscheinung der α-Umwandlung bilden.

Da ferner bei den strahlenlosen Umwandlungen des Actiniums und Mesothoriums 1 wie bei β-Umwandlungen eine Verschiebung zur nächsthöheren Gruppe des periodischen Systems stattfindet, muß man folgern, daß die Kerne dieser Elemente dabei ein Elektron verlieren. Daß diese Elektronen sich nicht als β-Strahlen nach außen bemerkbar machen, könnte durch ihre Weichheit bedingt sein. Es wäre aber auch möglich, daß das Elektron, nachdem es den Kern verlassen hat, in der äußeren Elektronenhülle stecken bleibt, wodurch das Atom, wie A. Sieverts bemerkte[1]), seinen ursprünglichen neutralen Zustand gleich behalten würde, während sonst nach einer β-Umwandlung das entstehende Atom positiv geladen zurückbleibt und aus der Umgebung ein Elektron aufnehmen muß, um neutral zu werden.

Es sei jetzt das Entstehen der Isotopen von diesem Standpunkte diskutiert: Erleidet ein Element (U_I) eine α-Umwandlung und folgen ihr dann zwei β-Umwandlungen (die des UX_1 und UX_2), so muß nach dem Obigen das nach der dritten Umwandlung entstehende Element (U_{II}) isotop mit dem ersten (U_I) sein, und die Kernladungen der beiden Elemente (U_I und U_{II}) müssen gleich sein. Nun ist aber die Kernladung gleich der Zahl der außerhalb des Kernes befindlichen negativen Elektronen, deren Anordnung um den Kern wiederum in erster Linie von den gegenseitigen elektrostatischen Kräften abhängen wird, die Kern und Elektronen aufeinander ausüben. Deshalb müssen die meisten physikalischen

---

[1]) Nach brieflicher Mitteilung.

und die chemischen Eigenschaften, die ja von der Anordnung dieser äußeren Elektronen abhängen, bei Elementen mit gleicher Kernladung, wie U_I und U_{II}, eine sehr weitgehende Übereinstimmung zeigen, obwohl ihre Atomgewichte wegen der Abgabe eines α-Teilchens sich um vier Einheiten unterscheiden. Dadurch ist das Wesen der Isotopie erklärt: ihr liegt die gleiche Kernladung mehrerer Elemente zugrunde.

Gleichzeitig ergibt sich aus dieser Betrachtung, daß die fundamentale Eigenschaft des Atoms, von der die meisten übrigen Eigenschaften in erster Linie abhängen, nicht das Atomgewicht, sondern die Kernladung ist. Natürlich sind die Kerne der Isotopen nicht identisch: die Zusammensetzung der Kerne von U_I und U_{II} unterscheidet sich ja um ein α-Teilchen und zwei Elektronen, und der Kern vom Radium B enthält sogar zwei α-Teilchen und vier Elektronen mehr als der Kern seines Isotopen, des Radium G. Das erklärt ja, warum die Isotopen sich so verschieden in bezug auf ihre radioaktiven Eigenschaften, z. B. die Lebensdauer, verhalten. Die verschiedene Konstitution der Kerne wird übrigens auch für die Eigenschaften der äußeren Elektronen nicht ganz ohne Einfluß sein können, wenn auch die aus diesem Grunde zu erwartenden Verschiedenheiten der chemischen und spektroskopischen Eigenschaften der Isotopen nur außerordentlich klein sind. So ist es anzunehmen, daß der im Kap. VII erwähnte kleine Unterschied in der Wellenlänge der Spektrallinien der Isotopen hauptsächlich dem Einfluß der Kernstruktur auf die Bewegung der äußeren Elektronen zuzuschreiben ist (39a). Da dieser Einfluß erst recht bei den dem Kern näheren „Röntgenstrahlenelektronen“ zu erwarten ist, kann man hoffen, daß die Verfeinerung der Röntgenspektroskopie sich für die Auffindung neuer Fälle der Isotopie noch von großem Wert erweisen wird.

4. Die Masse der Kerne.

Aus den obigen Betrachtungen ergibt sich von selbst eine Präzisierung der auf Grund der radioaktiven Tatsachen so naheliegenden Annahme, daß das Helium in anderen Elementen enthalten ist: wir müssen uns nämlich vorstellen, daß nicht das ganze Heliumatom, sondern nur sein Kern einen Bestandteil der schwe-

reren Kerne bildet. Dasselbe werden wir vom Wasserstoffatom anzunehmen haben, das nach den Ausführungen des nächsten Kapitels sich ebenfalls an dem Aufbau anderer Elemente beteiligt. Und da ja, wie erwähnt wurde, auch negative Elektronen in den Kernen mancher Elemente enthalten sind, kommen wir zu dem Ergebnis, daß selbst diese so winzigen Kerne höchst komplizierte Gebilde vorstellen, in denen gewaltige elektrische Kräfte herrschen müssen. Dies gibt uns einen Fingerzeig, worin die Abweichungen von der Proutschen Hypothese begründet sein können, falls die auf S. 66 erwähnte Annahme, daß manche unserer Elemente Gemische von Isotopen vorstellen, zur Erklärung nicht ausreichen sollte (40a). Die Masse der Atome muß sich nach den vorgebrachten Vorstellungen auf die Masse der sie zusammensetzenden positiven und negativen Teilchen zurückführen lassen. Nun kann man die bei der Bewegung von negativen Elektronen und von positiven Wasserstoffkernen zum Vorschein kommende Masse auf Grund der Theorie elektromagnetischer Erscheinungen durch elektrische und magnetische Kräfte erklären, die von diesen kugelförmig gedachten mit Oberflächenladung versehenen Teilchen ausgehen (sogenannte elektromagnetische Masse), wenn man annimmt, daß der Radius des negativen Elektrons von der Größenordnung 10^{-13} cm und der des Wasserstoffkernes noch kleiner ist. Man könnte sich nun weiter denken, daß der die Masse 4,00 und eine doppelte positive Ladung aufweisende Heliumkern (α-Teilchen) aus vier einfach positiv geladenen Wasserstoffkernen von der Masse 1,008 und zwei negativen Elektronen zusammengesetzt sei. Da nun, wie im nächsten Kapitel näher begründet wird, der Radius des α-Teilchens auch nur von der Größenordnung 10^{-13} cm ist, werden die bei der gemeinsamen Bewegung seiner dicht beieinander liegenden Bestandteile als Masse zur Geltung kommenden elektromagnetischen Wirkungen sich gegenseitig beeinflussen und man könnte so verstehen, warum die Masse des Heliumkernes nicht genau gleich dem Vierfachen der Masse des Wasserstoffkernes ist (W. D. Harkins). Eine ähnliche elektromagnetische gegenseitige Wechselwirkung zwischen den konstituierenden Teilen schwererer Kerne könnte zur Erklärung der Abweichungen von der Proutschen Hypothese herangezogen werden (40).

XIII. Die künstliche Zerlegung des Stickstoffatoms.

Im Anschluß an die im vorigen Kapitel besprochene Struktur der Kerne wurde der letzte Abschnitt der 1. Auflage dieser Schrift durch folgende Ausführung geschlossen:

„Für die Verfolgung des wichtigen Problems der Konstitution der Atomkerne und ihres Aufbaues aus positiven und negativen Teilchen bieten zurzeit nur die natürlichen radioaktiven Umwandlungen eine experimentelle Grundlage. Nicht nur für dieses Problem wäre es von größter Bedeutung, wenn es gelänge, die künstliche Umwandlung der Elemente ineinander zu erzwingen. Es ist vielleicht mehr als ein durch die großen Errungenschaften der letzten 20 Forschungsjahre bedingter Übermut, wenn man die Hoffnung nicht aufgibt, daß die Radiochemie in dieser Hinsicht doch noch erfolgreicher sein wird als die Alchemie."

Diese Hoffnung hat sich überraschend schnell verwirklicht, denn es konnte noch in der 1. Auflage in einem Nachtrage über die im Juni 1919 publizierten Versuche von E. Rutherford berichtet werden, aus denen hervorgeht, daß beim Zusammenstoß von α-Strahlen mit Stickstoffatomen aus letzteren Teilchen von kleiner Masse herausgeschleudert werden, die wohl mit Wasserstoffkernen zu identifizieren sein werden. Dies bedeutet aber die künstliche Zerlegung des Stickstoffatoms in einfachere Bestandteile. Bevor hier diese bahnbrechenden Versuche besprochen werden, muß zunächst noch auf einige frühere Untersuchungen der Rutherfordschen Schule eingegangen werden.

Wie bereits auf S. 75 erwähnt wurde, ist Rutherford zu seiner heute allgemein angenommenen Ansicht, daß die positive Elektrizität eines Atoms in einem im Vergleich zu den Dimensionen des ganzen Atoms sehr kleinen Kern konzentriert ist, zuerst durch das Studium des Durchganges der α-Strahlen durch Materie geführt worden. Und zwar waren es die scharfen Knicke[1]), die in Fig. 2 und 8 nahe dem Ende der sonst fast geradlinigen Bahn einzelner α-Teilchen zu sehen sind, die zu der Idee der Atomkerne den Weg

[1]) Das Auftreten dieser Knicke wurde zuerst auf anderem Wege von H. Geiger und E. Marsden (1911) im Laboratorium von Rutherford festgestellt.

ebneten. Diese starken Ablenkungen erleiden die mit Geschwindigkeiten von mehreren tausend km/sec fliegenden α-Teilchen offenbar beim Zusammenstoß mit einzelnen Atomen des durchflogenen Stoffes, sei es eines Gases, wie in Fig. 2 oder einer dünnen Metallfolie, wie bei den Versuchen von Geiger und Marsden. Es müssen somit bei einem solchen Zusammenstoß enorme ablenkende Kräfte in Wirkung treten, und Rutherford nahm an, daß es sich dabei um abstoßende elektrostatische Kräfte zwischen den positiv geladenen α-Teilchen und den positiven Ladungen innerhalb der durchflogenen Atome handelt. Der Größe der nötigen elektrostatischen Kraft kann aber nur im Falle einer sehr innigen Annäherung der sich abstoßenden Ladungen Rechnung getragen werden: bekanntlich wächst ja diese Kraft gemäß dem Coulombschen Gesetz umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung. Daraus ergab sich die Konsequenz, daß sowohl dem α-Teilchen (dem Kern des Heliumatoms) als auch den positiven Ladungen anderer Atome außerordentlich kleine Dimensionen zukommen müssen, und dieses Resultat führte bei näherer quantitativer Verfolgung[1]) zu der im Kapitel XII dargelegten Theorie des Kernatoms. Danach muß ein α-Teilchen (sein Durchmesser kann höchstens von der Größenordnung von 10^{-13} cm sein), das auf dem durch seine Reichweite begrenzten Wege viele Tausende von Atomen trifft, in diesen zwischen dem winzigen zentralen positiven Kern und den ihn umgebenden auf den Raum vom Radius 10^{-8} cm verteilten negativen Elektronen fliegen. Die allermeisten Atome werden durchquert, ohne daß sie die Richtung der α-Teilchen wesentlich beeinflussen, und nur bei einer kleinen Anzahl von Atomen kommen die α-Teilchen in unmittelbare Nähe des Kernes und erleiden die erwähnten großen Ablenkungen von ihrer geradlinigen Bahn. Die Zahl der starken Knicke ist deshalb so gering, weil die Wahrscheinlichkeit des Zusammenstoßes mit dem winzigen Kern auch nur eine sehr kleine ist.

Nun wird bei einem derartigen innigen Zusammenstoß nicht nur das α-Teilchen eine Ablenkung von seiner Bahn erleiden,

---

[1]) Als obere Grenze für den Radius des Atomkernes des Goldes ergab sich der Wert 3×10^{-12} cm.

sondern es muß auch das gestoßene Atom in Bewegung gesetzt werden, und zwar wird dieses nach den Gesetzen des elastischen Stoßes eine um so größere Geschwindigkeit erlangen, je kleiner seine Masse ist. Ganz besonders groß wird deshalb diese Geschwindigkeit werden, wenn ein α-Teilchen in unmittelbare Nähe eines Wasserstoffkernes kommt, etwa beim Durchqueren von Wasserstoffgas. Man kann diese Bewegung der gestoßenen Atome in der Fig. 8, die den Weg eines α-Teilchens in Luft abbildet, sehen, besonders deutlich aber für den Fall des Wasserstoffes in der nach D. Bose wiedergegebenen Fig. 9.

Fig. 8.



Fig. 9.



Wie C. G. Darwin berechnete, muß die Geschwindigkeit, die ein Wasserstoffkern in dem günstigsten Falle des zentralen Stoßes erlangt, 1,6mal größer sein als die Geschwindigkeit des auftreffenden, eine vierfache Masse besitzenden α-Teilchens. Es läßt sich theoretisch begründen, daß ein solches H-Teilchen bei gleicher Geschwindigkeit sehr angenähert auch die gleiche Reichweite hat wie ein α-Teilchen, und da (vgl. S. 16) die Reichweite der α-Teilchen proportional der dritten Potenz ihrer Geschwindigkeit ist, müßte ein solches durch zentralen Stoß entstandene schnelle H-Teilchen eine etwa viermal größere Reichweite als das ursprüngliche α-Teilchen besitzen.

Daß dies in der Tat zutrifft, hat E. Marsden (1914) gezeigt. Während die Reichweite von α-Teilchen, die aus einem sehr dünnwandigen Röhrchen mit Radiumemanation kamen, im Wasserstoff

vom Atmosphärendruck 24 cm betrug, konnten unter diesen Bedingungen noch in einer Entfernung von über 80 cm vom Röhrchen auf einem Zinksulfidschirm Szintillationen (vgl. S. 16) beobachtet werden. Daß diese Szintillationen von sehr schnellen *H*-Kernen, d. h. von einfach positiv geladenen Teilchen von der Masse 1 herrühren, wurde in den eben veröffentlichten Versuchen von Rutherford durch Messung der Ablenkung dieser Teilchen im elektrischen und magnetischen Feld bewiesen.

Derartige *H*-Teilchen mit großer Reichweite beobachteten E. Marsden und W. C. Lantsberry (1915) auch dann, als sie α-Teilchen durch eine sehr dünne Schicht einer wasserstoffhaltigen Substanz, z. B. Wachs, passieren ließen. Um ein solches schnelles *H*-Teilchen zu erzeugen, muß ja ein α-Teilchen ganz dicht an den Kern eines Wasserstoffatoms herankommen, und dieser erhält dabei einen so mächtigen Stoß, daß er aus dem Atomverband herausfliegt, gleichgültig, ob das Atom an seiner Oberfläche an andere chemisch gebunden war oder nicht. Wie selten übrigens derartige zentrale Zusammenstöße vorkommen, ergibt sich aus der Angabe von Rutherford, daß pro 10^5 α-Teilchen, von denen jedes auf seinem Wege durch 1 cm Wasserstoffgas mit etwa 10^4 Wasserstoffmolekülen zusammenstößt, nur ein *H*-Teilchen von großer Reichweite entsteht.

Von besonderem Interesse war die Beobachtung von Marsden und Lantsberry, daß man solche *H*-Teilchen auch unter Bedingungen erhalten kann, die keine äußere Quelle von Wasserstoff erkennen lassen: Ein mit Radium C bedecktes Nickelblech, das zwecks Vertreiben von etwa okkludiertem Wasserstoff oder Wasserdampf auf 150^0 erhitzt wurde, emittierte ebenfalls schnelle *H*-Teilchen. Es hatte somit den Anschein, als ob hier zum ersten Male die Abgabe von Wasserstoff neben Helium aus dem Innern radioaktiver Atome (Ra C) zur Beobachtung kam. Diesen wichtigen Befund unterzog Rutherford einer näheren Untersuchung und zeigte vor allem, daß diese „natürlichen" *H*-Teilchen nicht nur vom Ra C erhalten werden können. Auch ein Röhrchen, in das rasch vom Ra C praktisch freie Radiumemanation eingeführt wurde, emittierte unmittelbar danach solche *H*-Teilchen; und wenn auch deren Zahl mit der Zeit wuchs, war die Zunahme nicht entfernt so stark, wie es dem Anwachsen der Menge des aus der Emanation über

Ra A und Ra B allmählich entstehenden Ra C entsprochen hätte. Es müßte also auch die Emanation selbst bzw. das Ra A *H*-Teilchen geben, wenn nicht, was Rutherford für möglich hält, doch vielleicht okkludierter Wasserstoff für diese Erscheinung verantwortlich zu machen ist. Über diesen wichtigen Punkt brachten also die Rutherfordschen Versuche keine eindeutige Entscheidung; sie führten aber zu einem ganz überraschenden Resultat, als der Einfluß verschiedener Gasfüllung auf die Emission der fraglichen „natürlichen" *H*-Teilchen seitens eines mit Ra C bedeckten Bleches studiert wurde [1]). Es wurden nämlich bei Szintillationszählung erheblich mehr Teilchen mit großer Reichweite beobachtet, wenn der Raum zwischen dem Ra C und dem Zinksulfidschirm getrocknete Luft enthielt, als wenn er leer gepumpt war oder Kohlensäure bzw. Sauerstoff enthielt. Selbst wenn die Kohlensäure oder der Sauerstoff mit Wasserdampf [2]) bei 20⁰ gesättigt waren, erhielt man weniger Szintillationen als in Luft.

Rutherford folgerte daraus, daß es nur der Stickstoff der Luft sein konnte, der diesen verstärkten Effekt hervorruft, und in der Tat wurde bei Verwendung von chemisch-reinem Stickstoff eine um 25 Proz. größere Zahl dieser Szintillationen gefunden, als in Luft. Durch besondere Versuche konnte festgestellt werden, daß diese vermehrte Zahl von Teilchen mit großer Reichweite durch die α-Teilchen des Ra C erst auf deren Wege im Gasraum erzeugt wurde. Die Durchdringungsfähigkeit der in Luft oder Stickstoff erhaltenen Teilchen war, ähnlich wie bei den in Wasserstoffgas entstehenden *H*-Teilchen, bis etwa viermal größer als die Durchdringungsfähigkeit der sie erzeugenden α-Strahlen. Eine so große Wucht können die α-Teilchen nur solchen Partikeln erteilen, die eine beträchtlich kleinere Masse als sie selbst besitzen, und man kann deshalb schwerlich die Schlußfolgerung umgehen, daß es

---

[1]) In diesem wie auch in manchen der früheren Versuche waren vor dem in einer Entfernung von etwa 3 cm vom Ra C befindlichen Zinksulfidschirm dünne Metallfolien eingeschaltet, deren Dicke so bemessen wurde, daß sie die α-Teilchen des Ra C vollkommen aufhielten, die *H*-Teilchen aber noch leicht durchließen.

[2]) Getrocknete Kohlensäure oder Sauerstoff verminderten infolge der Bremsung der „natürlichen" vom Ra C kommenden *H*-Teilchen die Zahl der im Vakuum beobachteten Szintillationen.

Rutherford gelungen ist, aus dem Kern des Stickstoffatoms mit Hilfe von α-Strahlen leichte Teilchen herauszuschießen. Diese werden sich wohl bei näherer Untersuchung als Wasserstoffkerne erweisen: dafür spricht nicht nur die Übereinstimmung dieser Teilchen mit den H-Teilchen in bezug auf das Aussehen der von ihnen hervorgerufenen Szintillationen und in bezug auf ihre Reichweite, sondern auch ein vorläufiger Versuch ihrer Ablenkung im Magnetfeld. Rutherford hält es übrigens nicht für ausgeschlossen, daß es Teilchen von der Masse 2 seien.

Auf jeden Fall ist durch diese Versuche zum erstenmal nachgewiesen worden, daß nicht nur die schweren radioaktiven Kerne, sondern auch der zu den leichtesten gehörende Stickstoffkern aus einfacheren Bestandteilen aufgebaut ist. Wirft man einen Blick auf die auf S. 66 erwähnten zwei Reihen von leichten Elementen, so fällt es sofort auf, daß die Atomgewichte der Elemente mit geraden Ordnungszahlen sich sehr annähernd durch die Formel $n \times 4{,}0$, die von ungerader Ordnungszahl durch $n \times 4{,}0 + 3$ darstellen lassen. Es drängt sich die Vermutung auf, daß die ersteren nur aus Helium aufgebaut sind (vgl. auch S. 78), und daß die Kerne der anderen neben Helium auch drei Wasserstoffkerne enthalten. Der Stickstoff fällt insofern aus der Reihe heraus, als sein A. G. $14{,}01 = 3 \times 4{,}00 + 2$ ist, so daß, falls er sich nicht als ein Gemisch von Isotopen mit A. G. 13 und 15 erweisen sollte, im Stickstoffkern neben drei Heliumkernen entweder ein Teilchen mit der Masse 2 [1]) oder zwei Wasserstoffkerne anzunehmen wären. In letzterem Falle müßte übrigens der Stickstoffkern auch noch ein negatives Elektron enthalten, denn drei doppelt geladene Heliumkerne und zwei einfach geladene H-Kerne würden ihm die Kernladung 8 verleihen, statt 7, die auf Grund seiner Ordnungszahl anzunehmen ist. Aus dieser Betrachtung ergibt sich auch, weshalb weder im Sauerstoff noch in Kohlensäure H-Teilchen erzeugt wurden, denn das A. G. sowohl des Sauerstoffs (16,00) wie des Kohlenstoffs (12,00) lassen einen reinen Heliumaufbau vermuten.

Es ist von großem Interesse, daß die Zahl der aus den Stickstoffkernen herausgeschleuderten H-Teilchen etwa zwölfmal kleiner

[1]) Es könnte sich um eines der aus spektroskopischen Gründen vermuteten außerirdischen Elemente Nebulium u. a. handeln (43).

ist, als sie bei gleicher Zahl von Zusammenstößen der α-Teilchen mit unverbundenen H-Kernen des Wasserstoffgases erhalten wird. Daraus und aus den oben gemachten Angaben folgt, daß nur etwa 1 pro 10^{10} Zusammenstöße der α-Teilchen mit Stickstoffmolekeln zum Zerfall des Stickstoffatoms führt und daß dazu eine besondere Region dessen Kernes getroffen werden muß. Aus den Versuchen ergibt sich auch, daß der Durchmesser des Stickstoffkernes von der Größenordnung von 10^{-12} cm ist und daß bei günstigem Zusammenstoß eines α-Teilchens mit einem Wasserstoffkern deren Zentren auf eine Entfernung von etwa 3×10^{-13} herankommen können.

Nachdem die vielen Bemühungen, den natürlichen Zerfall der Radioelemente zu beeinflussen, bis jetzt ohne Erfolg geblieben sind (vgl. S. 14) und auch das von mehreren Forschern festgestellte Auftreten von Helium und Neon in Entladungsröhren keine bindenden Schlußfolgerungen zuließ (43), sind die beschriebenen Versuche als die erste, wie es scheint, eindeutig nachgewiesene künstliche Zerlegung des Atoms eines chemischen Elementes zu betrachten. Die α-Teilchen, die die größten zur Verfügung stehenden Energiekonzentrationen repräsentieren, als Werkzeug und die wunderbaren H-Teilchen als analytisches Hilfsmittel haben in gleichem Maße zum Erfolg beigetragen (44).

XIV.
Revision des Begriffes des chemischen Elementes.

Von wie großer Bedeutung die in den vorherigen Kapiteln besprochenen Tatsachen für die Lehre von den chemischen Elementen sind, ersieht man unter anderem daraus, daß sie den alten, von Boyle und Lavoisier aufgestellten Begriff des chemischen Elementes mehr als einmal zum Wanken gebracht haben. Während die natürlichen Umwandlungen der Radioelemente sich leicht mit der alten Elementdefinition versöhnen ließen, stehen sich in der Frage nach der zweckmäßigsten Auffassung des Verhältnisses der Erscheinungen der Isotopie zum Elementbegriff zwei Meinungen gegenüber, von denen die eine, wie im Abschnitt 1 gezeigt wird, eine vollkommene Umgestaltung des Elementbegriffes verlangt.

Noch bevor man zu einer Einigung in dieser Frage gelangt ist, stellt die von Rutherford erzielte künstliche Zerlegung des Stickstoffatoms den Elementbegriff auf eine erneute Probe, worüber im Abschnitt 2 die Rede ist.

1. Der Elementbegriff und die Isotopie.

Es besteht hier eine eigenartige Sachlage: die Isotopen verhalten sich in bezug auf die für die Charakterisierung und Erkennung der Elemente so wichtigen qualitativ-chemischen Eigenschaften wie ein Element, in bezug auf das nicht minder wichtige Atomgewicht wie verschiedene Elemente. So erklärt es sich, daß heute in der Anwendung des Elementbegriffs auf die Isotopen zwei verschiedene Meinungen vertreten werden: einige Autoren, mit besonderem Nachdruck Paneth, betrachten die Isotopen nicht als verschiedene Elemente, sondern als verschiedene Arten desselben Elementes. Der Verfasser empfiehlt jedoch, die Isotopen als verschiedene Elemente anzusehen und die weitgehende Übereinstimmung, die sie in ihren meisten Eigenschaften zeigen, durch Einführung des Begriffes des chemischen Elemententypus zum Ausdruck zu bringen, also die Isotopen als verschiedene Elemente desselben chemischen Typus anzusehen.

Wenn es sich auch bei diesen auseinandergehenden Meinungen schließlich nur um Unterschiede der Terminologie handelt, so werden sich die Chemiker wegen der großen Bedeutung, die der Begriff und das Wort „Element" für sie besitzt, früher oder später genötigt sehen, den Gebrauch nur einer dieser zwei Auffassungen zu vereinbaren. Bei der zu treffenden Wahl wird man wohl in erster Linie bestrebt sein, den bisherigen Elementbegriff möglichst wenig zu verändern. Es sei deshalb hier nur auf die Frage eingegangen, welche von den beiden Auffassungen an dem alten Elementbegriff weniger rüttelt.

Betrachtet man die Isotopen nicht als verschiedene Elemente, so stellen die in bezug auf die Methodik ihrer Untersuchung so gänzlich verschiedenen Stoffe, wie das kurzlebige Ra B und das gewöhnliche Blei oder die zwei Bleiarten $\overset{206}{Pb}$ und $\overset{208}{Pb}$, dasselbe Element vor. Die radioaktiven Eigenschaften, die die Entdeckung

so vieler Elemente ermöglicht haben, und das A. G. hören auf, für ein Element charakteristisch zu sein, und die Frage, ob zwei durch diese Eigenschaften leicht voneinander unterscheidbaren Stoffe dasselbe oder verschiedene Elemente sind, kann nur auf Grund ihres qualitativ-chemischen Verhaltens (oder anderer Typuseigenschaften, vgl. S. 60) entschieden werden. Da aber in diesem Verhalten nicht nur die einheitlichen Glieder einer Plejade, sondern auch ihre Gemische übereinstimmen, so muß man von diesem Standpunkte aus auch ein Gemisch von Ra B und Blei oder eine durch Zusammenschmelzen von $\overset{206}{Pb}$ und $\overset{207}{Pb}$ erhaltene Legierung als Elemente betrachten, obwohl man mit voller Sicherheit weiß, Gemische vor sich zu haben. Diese Betrachtungsweise verlangt natürlich die Preisgabe der primitivsten Vorstellungen, die man an das Wort Element bis jetzt geknüpft hat.

Wir waren weiterhin gewohnt, die Zahl der Elemente mit der Zahl der durch erschöpfende Analyse zu erreichenden unterscheidbaren Bestandteile der Stoffe zu identifizieren, und darin lag ja der Hauptwert und Hauptzweck des Elementbegriffes, denn „Element" heißt Bestandteil. Faßt man die Isotopen jedoch als dasselbe Element auf, so gilt das nicht mehr. Denn $\overset{206}{Pb}Br_2$ und $\overset{208}{Pb}Br_2$ bestehen nach dieser Auffassung nur aus zwei Elementen, nämlich aus Brom und Blei, obwohl sie sich in drei unterscheidbare Bestandteile zerlegen lassen, nämlich in Brom, $\overset{206}{Pb}$ und $\overset{208}{Pb}$. Das Element hört also auf, ein bestimmter Bestandteil der Stoffe zu sein, der vollkommen eindeutige Eigenschaften besitzt; es wird nur zum Träger von gewissen Eigenschaften (die wir Typuseigenschaften genannt haben). Wir hätten also einen vollkommen neuen Elementbegriff, der im Grunde genommen mehr Gemeinsames mit dem Elementbegriff von Aristoteles als mit dem von Boyle hätte, denn auch bei Aristoteles waren die vier Elemente Erde, Wasser, Feuer und Luft nicht als wirkliche Bestandteile anderer Stoffe, sondern nur als Träger der Eigenschaften trocken-kalt, feucht-kalt, trocken-warm und feucht-warm gedacht.

Dazu kommt noch, daß, wie in Kap. VII erwähnt wurde, die Isotopen selbst in den erwähnten gemeinsamen Eigenschaften theoretisch nicht vollkommen, sondern nur weitgehend überein-

stimmen und daß es bei manchen dieser Eigenschaften nur eine Frage der Zeit ist, bis es gelingen wird, auch mit ihrer Hilfe die Isotopen voneinander zu unterscheiden. So wurde noch vor wenigen Monaten an dieser Stelle der 1. Auflage als eines der stärksten Argumente für die Auffassung der Isotopen als dasselbe Element ihre Übereinstimmung in einer für die Charakterisierung und Erkennung der Elemente so wichtigen Eigenschaft wie das gewöhnliche Spektrum erwähnt. Jetzt, nachdem es gelungen ist, darin Unterschiede zwischen den Bleiarten zu finden (S. 58), muß dieses Argument in Wegfall kommen.

Prinzipiell stimmen die Isotopen nur darin vollkommen überein, daß die algebraische Summe der ihre Kerne zusammensetzenden positiven und negativen Bestandteile gleich ist. Da jedoch die so definierte Kernladung eine mathematische Abstraktion ist, läßt sich die Kernladung nicht, wie vorgeschlagen wurde, als Grundlage für eine naturwissenschaftliche Elementdefinition benutzen.

Zwei als wichtige Erkenntnisse der bisherigen Elementenlehre geltende Sätze dürften allerdings aufrecht erhalten bleiben, wenn man die Isotopen als dasselbe Element betrachten würde. Einerseits wäre, wie bis vor kurzem, die Zahl der existierenden Elemente als identisch mit der Zahl der Stellen im periodischen System anzusehen, andererseits könnte man auch weiterhin behaupten, auf Grund der qualitativ-chemischen Eigenschaften alle Elemente voneinander unterscheiden zu können. Diese beiden Sätze verlieren ihre Gültigkeit, wenn man die Isotopen als verschiedene Elemente betrachtet, denn sie gelten in diesem Falle nicht mehr für Elemente, sondern für die Elemententypen. Daraus darf man aber nicht folgern, daß der Elementbegriff eine wesentliche Umgestaltung erleidet, wenn die Isotopen als verschiedene Elemente angesehen werden. Denn der größte Fortschritt, den wir der Entdeckung der Isotopie verdanken, besteht eben darin, daß wir jetzt imstande sind, eine größere Mannigfaltigkeit der Bestandteile der Materie, der Elemente zu erkennen, als es auf Grund der erwähnten Typuseigenschaft möglich war, oder als die Zahl der Stellen des periodischen Systems vorauszusehen erlaubte. Es ist deshalb nicht möglich, die obigen zwei Sätze in ihrem bisherigen Wortlaut aufrecht zu erhalten, ohne eine mehr oder minder willkürliche Fest-

setzung darüber zu machen, welche Unterscheidungsmethoden zur Elementaranalyse zugelassen werden und welche nicht.

Im übrigen bleibt aber der Inhalt des Elementbegriffes bei der Betrachtung der Isotopen als verschiedene Elemente gänzlich unverändert. Da diese Betrachtungsweise in den vorhergehenden Kapiteln durchweg angewandt worden ist, brauchen wir hier nicht darauf einzugehen, wie die einzelnen Fragen der Elementenlehre sich von diesem Standpunkte aus darstellen lassen. Bevor wir aber formulieren, welche Stoffe man jetzt zu den Elementen rechnen wird, wenn man diesen Standpunkt annimmt, muß noch der anderen fundamentalen Erkenntnisse gedacht werden, die die Elementenlehre der radioaktiven Forschung verdankt.

2. Der Elementbegriff und die radioaktiven Umwandlungen.

Die radioaktiven Umwandlungen haben unzweifelhaft bewiesen, daß alle Stoffe, die im periodischen System zwischen Uran und Wismut stehen und dazu noch einige Glieder der Wismut-, Blei- und Thalliumplejade in die einfacheren Bestandteile Helium und die stabilen Bleiarten Ra G = $\overset{206,0}{\text{Pb}}$ und Th D = $\overset{208}{\text{Pb}}$ zerfallen, also als aus diesen Bestandteilen zusammengesetzt aufgefaßt werden können. Es wäre aber sicherlich verfehlt, wenn man diese zusammengesetzten Stoffe aus der Liste der Elemente entfernen würde und sie etwa zu chemischen Verbindungen rechnen wollte. Alles spricht dafür, daß die Elemente der letzten zwei Horizontalreihen des periodischen Systems in der Rangliste der Stoffe auf dieselbe Stufe gestellt werden müssen, wie die übrigen Glieder des periodischen Systems, so daß man kaum daran zweifeln kann, daß die übrigen Elemente ebenso wenig einfach sind, wie die zwischen Uran und Thallium stehenden. Durch die Abspaltung von Wasserstoffteilchen aus Stickstoffatomen ist übrigens die zusammengesetzte Natur auch der letzteren direkt erwiesen. Wollte man diese Art der Zusammengesetztheit als ein genügendes Hindernis für die Auffassung eines Stoffes als Element ansehen, so dürfte man vom Standpunkte der modernen Vorstellungen über die Struktur der Atome auf die Liste der Elemente nur das negative und positive Elektron, die man zurzeit als einfach ansieht, setzen, und müßte alle Stoffe streichen. Das würde natürlich

eine völlige Umgestaltung des bisherigen Elementbegriffes bedeuten. Man muß also die durch die natürlichen und künstlichen radioaktiven Umwandlungen erwiesene zusammengesetzte Natur der Radioelemente und des Stickstoffs und diejenige, welche wir durch die Zerlegungskunst der Chemiker kennen gelernt haben, auseinanderhalten. Bis vor kurzem bestand das wichtigste Grenzmerkmal der beiden Zerlegungserscheinungen darin, daß man die radioaktiven Umwandlungen in keiner Weise künstlich zu beeinflussen oder umzukehren verstand, während man die Zerlegung der Verbindungen in die Elemente und den umgekehrten Vorgang weitgehend in der Hand hatte. Es war somit eine scharfe Abgrenzung leicht möglich.

Nun ist es aber bei Stickstoff gelungen, eine künstliche Zerlegung zu erzwingen. Und wenn auch die dabei benutzte Methode sich weitgehend von den bisherigen physikalischen und chemischen Zerlegungsmethoden unterscheidet, so ist es nicht mehr möglich, eine allgemeine befriedigende Definition des Elementes auf das Kriterium der Unzerlegbarkeit oder der Unzerlegtheit zu gründen, wenn man den Stickstoff, worüber kein Zweifel herrschen kann, auch weiterhin als ein Element betrachten will (46).

Man muß also jetzt, ein viertel Jahrtausend nach Boyle, das von ihm eingeführte Kriterium fallen lassen und ein neues zur Entscheidung der Frage einführen, ob ein bestimmter Stoff als aus gleichen Atomen bestehend angesehen und deshalb zu den Elementen gerechnet werden darf, oder ob er verschiedene Atome enthält und deshalb ein Gemisch bzw. eine Verbindung mehrerer Elemente vorstellt. Ein Blick auf die Fig. 6 zeigt, daß das bei den verschiedenen Elementen einen ganz analogen, verhältnismäßig einfachen Bau zeigende Röntgenspektrum eine zur Charakterisierung der Atome besonders geeignete Eigenschaft vorstellt[1]). Wenn auch die Röntgenspektren mancher Elemente gewisse Komplikationen aufweisen, die bei anderen fehlen, wird es wohl den Spektroskopikern mit der Zeit gelingen, den Begriff des „einfachen Röntgenspektrums“ zu präzisieren, das dann die geeignetste Grundlage für die Elementdefinition bilden würde.

---

[1]) Das gilt in noch höherem Maße für die K-Strahlung.

Ein Punkt muß aber noch berücksichtigt werden. Wie S. 74 erwähnt wurde, ist es bei der bisher erreichten Genauigkeit noch nicht gelungen, zwischen den Isotopen Unterschiede im Röntgenspektrum aufzufinden, so daß das Spektrum eines Gemisches von Isotopen etwa das des gewöhnlichen Chlors als „einfach" erscheint. Dasselbe würde sich bei anderen Isotopen, etwa bei einem Gemisch von Thorium und Ionium zeigen. Einstweilen genügt also zur erschöpfenden Elementaranalyse das Röntgenspektrum nicht und man muß deshalb definieren:

„Ein chemisches Element ist ein Stoff, der ein ‚einfaches Röntgenspektrum' zeigt und nicht als Gemisch anderer Stoffe erkannt worden ist."

Ganz befriedigen kann aber auch diese Definition nicht, weil man bei den Elementen, die im periodischen System vor dem Natrium stehen, überhaupt noch kein Röntgenspektrum beobachtet hat. Die Elementenlehre ist augenblicklich in einer so regen Entwicklung begriffen, daß es kaum möglich ist, eine dauerhafte Definition des Elementes aufzustellen, und die obigen Ausführungen sollen nur den jetzigen Stand der Frage schildern und die Gesichtspunkte andeuten, die bei der zukünftigen Ausgestaltung der Definition berücksichtigt werden müssen.

Sieht man vom Stickstoff ab, so paßt übrigens auf die in der Tab. 10 aufgezählten Elemente am besten die vom Verfasser vor einigen Jahren vorgeschlagene Definition:

„Ein chemisches Element ist ein Stoff, der durch kein Mittel in einfachere Bestandteile zerlegt und nicht als Gemisch anderer Stoffe erkannt worden ist" (45).

XV. Rückblick und Ausblicke.

Nachdem wir in den vorhergehenden Kapiteln die allmähliche Entwicklung geschildert haben, die unsere Kenntnisse der chemischen Elemente in den letzten Jahren durch die Erforschung der Radioaktivität, der charakteristischen Röntgenstrahlen und der Atomstruktur erfahren haben, sei zum Schluß ein kurzer Blick auf den jetzigen Stand und die noch offenen Probleme der Lehre

von den chemischen Elementen geworfen. Wir werden dabei wie bis jetzt die Isotopen als verschiedene Elemente betrachten.

Man gelangte bis jetzt bei der Zerlegung und Untersuchung aller Stoffe zu 121[1]) verschiedenen Bestandteilen, die weder weiter zerlegt, noch als Gemische anderer Stoffe erkannt werden konnten. Das sind die chemischen Elemente. Etwa 30 dieser Elemente unterscheiden sich von einigen anderen hauptsächlich nur im Atomgewicht oder in radioaktiven Eigenschaften, während sich im qualitativ-chemischen, elektrochemischen Verhalten kein Unterschied finden ließ. Solche Elemente gleichen chemischen Verhaltens gehören also dem gleichen chemischen Elemententypus an (isotope Elemente).

Man hat bis jetzt Elemente von 87 verschiedenen Typen festgestellt. Jedem Elemententypus entspricht auch ein bestimmtes charakteristisches Röntgenspektrum. Die Untersuchung dieser Spektren zeigte, daß wir noch nicht alle möglichen Typen kennen gelernt haben. Ordnet man nämlich die Elemente nach wachsenden Frequenzen der analogen Linien ihrer Röntgenspektren, so ergibt sich eine nahezu lineare, von Moseley aufgestellte Beziehung zwischen der so erhaltenen Ordnungszahl der Elemente (Elemente desselben Typus haben die gleiche Ordnungszahl) und der Quadratwurzel aus der Frequenz der Linien (Fig. 7). Diese Beziehung ist aber nur dann auf alle Elemente anwendbar, wenn man annimmt, daß uns von fünf Typen mit den Ordnungszahlen 43, 61, 75, 85 und 87 noch kein Repräsentant bekannt ist. Die gesamte Zahl der zwischen Wasserstoff und Uran möglichen Typen ergibt sich somit zu 92. Wie sich theoretisch zeigen läßt, ist die so bestimmte Ordnungszahl gleich der positiven Kernladung des Atoms des betreffenden Elementes.

Die Kernladung (Ordnungszahl) steht mit anderen Eigenschaften der Elemente nicht in so einfacher Beziehung wie mit der Frequenz im Röntgenspektrum, denn die chemischen und vielen physikalischen Eigenschaften der Elemente sind nicht lineare, sondern periodische Funktionen ihrer Kernladung, was zur Aufstellung

---

[1]) Vgl. Tabelle 10. Wegen Stickstoff vgl. die vorhergehenden Seiten.

des durch die Tabelle (9) wiedergegebenen periodischen Systems der chemischen Elemente (Elemententypen) führt. Elementen von gleichem Typus kommt die gleiche Stelle (Isotope) im System zu, und die so resultierenden Elementenplejaden, die außer in dem Teil des Systems zwischen dem Uran- und dem Thalliumtypus auch beim Chlor- und Neontypus auftreten, weisen zwei bis sieben Elemente auf, wie es die Tabellen 6 und 10 zeigen.

Da innerhalb einer Plejade die Atomgewichte der Isotopen bis um acht Einheiten differieren, kann man strenggenommen einer Stelle des periodischen Systems kein eindeutiges A. G zuschreiben. Da jedoch von den meisten Typen nur ein Element bekannt ist, kann man in die Tabelle 9 sein A. G. einsetzen und in dem Gebiet der Plejaden das A. G. des verbreitetsten bzw. des langlebigsten Elementes oder wie beim Chlor und Neon das mittlere A. G. (Verbindungsgewicht) des in der Natur vorkommenden Gemisches wählen. Es ergibt sich dabei das bemerkenswerte Resultat, daß die Anordnung der Elemente nach steigender Kernladung mit sehr wenigen Ausnahmen zugleich auch eine Anordnung nach steigendem A. G. ist. Doch muß man den Inhalt des periodischen Systems jetzt so formulieren, daß die Eigenschaften der Elemente periodische Funktionen der Kernladung ihrer Atome sind (nicht wie bis jetzt des Atomgewichtes).

Die Existenz von noch unbekannten Elementen mit den Ordnungszahlen 43, 75, 85 und 87 wird von der Tabelle des periodischen Systems ebenso gefordert wie von dem Moseleyschen Gesetz über die Röntgenspektren. Jene gestattet außerdem, den chemischen Typus der fehlenden Elemente vorauszusagen: den Nummern 43 und 75 entsprechen Analoge des Mangans, Platz 85 weist auf ein unbekanntes Halogen, 87 auf ein Alkalimetall (wohl beide radioaktiv) hin.

Die durch die Moseleysche Beziehung aufgedeckte Lücke mit der Ordnungszahl 61 konnte jedoch auf Grund des periodischen Systems nicht vorausgesagt werden, da dieses in dem betreffenden Gebiet eine merkwürdige Anomalie zeigt. Die Eigenschaften der Elemente zeigen in diesem Teil des Systems nicht die in anderen Horizontalreihen von Stelle zu Stelle auftretende Abstufung, denn die ganze in der Tabelle 9 abgesonderte aperiodische Gruppe der

seltenen Erdmetalle mit den Ordnungszahlen 59 bis 72 weist Elemente von sehr ähnlichem chemischen Verhalten auf (47).

Die Entdeckung wenigstens je eines Repräsentanten der noch freien Stellen des periodischen Systems würde zu den schönsten Erfolgen der weiteren Entwicklung der Elementenlehre gehören und wäre als ein Abschluß der bereits auf Jahrhunderte zurückblickenden Erforschung der Elemententypen zu betrachten. Damit wären aber, wie es noch vor kurzem scheinen konnte, unsere Kenntnisse der Welt der Elemente durchaus nicht erschöpft. Die alle 92 Typen umfassende Tabelle des periodischen Systems weist jedem Typus nur je eine Stelle zu. Wir wissen aber, daß von manchen Typen mehrere Elemente existieren, und man muß deshalb ein komplizierteres Gebäude aufrichten, um alle Elemente unterbringen zu können. So kann man die Isotopen an den zugehörigen Stellen des periodischen Systems statt in derselben Ebene senkrecht zu ihr in der Reihenfolge der Atomgewichte anordnen. Die gewöhnliche Tabelle des periodischen Systems bildet dann eine Projektion eines wirklichen räumlich gedachten Systems. Im Gebiete der Radioelemente befinden sich über und unter dieser Projektionsebene, in der nur die langlebigsten Glieder der Plejaden fixiert sind, noch weitere Stockwerke.

Nach den neuesten Erfolgen, die Aston mit der Kanalstrahlenanalyse erzielt hat, ist zu erwarten, daß man sehr bald auch andere Teile des Gebäudes durch solche Ober- und Unterbauten wird ergänzen müssen, d. h. daß sich auch von anderen Typen mehr als ein Element wird auffinden lassen, etwa durch Zerlegung der jetzt zu den Elementen gerechneten Stoffe in Isotope oder auf anderem Wege. Es ist noch gar nicht abzusehen, welche Früchte die weitere Forschung in dieser Richtung ergeben kann.

Es entsteht auch die Frage, ob die genetischen Beziehungen zwischen den Elementen auf die letzten zwei Reihen des Systems beschränkt sind, oder ob auch die übrigen Elemente Umwandlungen unterliegen, die sich nur wegen ihrer geringen Geschwindigkeit bis jetzt dem Nachweis entzogen haben. Viel zu denken gibt ja in dieser Hinsicht die Tatsache, daß die Elemente Kalium und Rubidium trotz ihrer verhältnismäßig niedrigen Atomgewichte radioaktiv sind und nach dem Verschiebungssatz mit Elementen des

Calcium- bzw. Strontiumtypus in genetischer Beziehung stehen müßten, falls ihre β-Strahlung die Begleiterscheinung einer radioaktiven Umwandlung ist. Fraglich ist auch, ob die Aktivität dieser Alkalimetalle ihrer Hauptmasse zukommt oder auf Beimengungen kurzlebigerer Isotope zurückzuführen ist (48).

Das Suchen nach dem Stein der Weisen wird auch nach der Zertrümmerung des Stickstoffatoms durch α-Teilchen nicht aufhören. Denn die Rutherfordsche Methode hat einen beschränkten Anwendungsbereich: Sie erlaubt nur dann eine erfolgte Atomzerlegung mit Sicherheit zu erkennen, wenn Wasserstoffkerne als eins der Zerlegungsprodukte auftreten. Da zur Zerlegung eines Stickstoffatoms 10^5 α-Teilchen nötig sind, wird man sich ein leichter zugängliches Werkzeug von ähnlicher Energiekonzentration wünschen müssen, um zur praktischen Verwandlung der Elemente zu gelangen.

Tabelle 9a. Das periodische System der Elemente.

1 H
1,008

Periode	Reihe	Gruppe 0 — VIII	Gruppe I a b	Gruppe II a b	Gruppe III a b	Gruppe IV a b	Gruppe V a b	Gruppe VI a b	Gruppe VII a b
I	1	2 He 4,00	3 Li 6,94	4 Be 9,1	5 B 11,0	6 C 12,00	7 N 14,01	8 O 16,00	9 F 19,0
II	2	10 Ne 20,2	11 Na 23,00	12 Mg 24,32	13 Al 27,1	14 Si 28,3	15 P 31,04	16 S 32,06	17 Cl 35,46
III	3	18 A 39,88	19 K 39,10	20 Ca 40,07	21 Sc 45,1	22 Ti 48,1	23 V 51,0	24 Cr 52,0	25 Mn 54,93
	4	26 Fe 55,84 · 27 Co 58,97 · 28 Ni 58,68	29 Cu 63,57	30 Zn 65,37	31 Ga 69,9	32 Ge 72,5	33 As 74,96	34 Se 79,2	35 Br 79,92
IV	5	36 Kr 82,92	37 Rb 85,45	38 Sr 87,63	39 Y 88,7	40 Zr 90,6	41 Nb 93,5	42 Mo 96,0	43 —
	6	44 Ru 101.7 · 45 Rh 102,9 · 46 Pd 106,7	47 Ag 107,88	48 Cd 112,4	49 In 114,8	50 Sn 118,7	51 Sb 120,2	52 Te 127,5	53 J 126,92
V	7	54 X 130,2	55 Cs 132,81	56 Ba 137,37	57 La 139,0	58 Ce 140,25	59 Pr 140,9 · 60 Nd 144,3	61 — · 62 Sm 150,4	63 Eu 152,0
	8	64 Gd 157,3 · 65 Tb 159 2 · 66 Dy 162,5	67 Ho 163,5 · 68 Er 167,7	69 Tu I 168,5	70 Yb 173,5 · 71 Lu 175,0	72 Tu II	73 Ta 181,5	74 W 184,0	75 —
	9	76 Os 190,9 · 77 Ir 193,1 · 78 Pt 195,2	79 Au 197,2	80 Hg 200,6	81 Tl 204,0	82 Pb 207,20	83 Bi 208,0	84 Po (210,0)	85 —
VI	10	86 Em (222,0)	87 —	88 Ra 226,0	89 Ac (227)	90 Th 232,15	91 Pa (230)	92 U 238,2	

Neben den Bezeichnungen der Elemente sind die Ordnungszahlen, darunter die Atomgewichte angegeben. — Zwischen Uran (92) und Thallium (81) weist fast jede Stelle des Systems mehrere, meistens radioaktive Elemente auf (vgl. Tabelle 6 und 10). In die obige Tabelle wurde das Symbol und Atomgewicht nur des langlebigsten bzw. verbreitetsten Gliedes jeder Plejade eingesetzt. Das in der Natur vorkommende Chlor und Neon sind Gemische (Mischelemente) von je zwei Elementen, deren Atomgewichte in Tab. 10 angegeben sind. — Die eingeklammerten Atomgewichte von Po und Em sind rechnerisch ermittelt, die von Ac und Pa sind hypothetisch.

Tabelle 9b.

I a	I b	II a	II b	III a	III b	IV a	IV b	V a	V b	VI a	VI b	VII a	VII b	VIII	0
1 H															2 He
3 Li		4 Be		5 B			6 C		7 N		8 O		9 F		10 Ne
11 Na		12 Mg		13 Al			14 Si		15 P		16 S		17 Cl		18 A
19 K		20 Ca		21 Sc		22 Ti		23 V		24 Cr		25 Mn		26 Fe 27 Co 28 Ni	
	29 Cu		30 Zn		31 Ga		32 Ge		33 As		34 Se		35 Br		36 Kr
37 Rb		38 Sr		39 Y		40 Zr		41 Nb		42 Mo		43 —		44 Ru 45 Rh 46 Pd	
	47 Ag		48 Cd		49 In		50 Sn		51 Sb		52 Te		53 J		54 X
55 Cs		56 Ba		57 La		58 Ce	59 Pr 60 Nd 61 — 62 Sm 63 Eu 64 Gd 65 Tb 66 Dy								
67 Ho 68 Er 69 Tu I 70 Yb 71 Lu 72 Tu II								73 Ta		74 W		75 —		76 Os 77 Ir 78 Pt	
	79 Au		80 Hg		81 Tl		82 Pb		83 Bi		84 Po		85 —		86 Em
87 —		88 Ra		89 Ac		90 Th		91 Pa		92 U					

Obige Tabelle bringt die besondere Stellung des Wasserstoffes und Heliums, der vermeintlichen Bestandteile aller übrigen Elemente zum Ausdruck. Neben den Symbolen sind die Ordnungszahlen angegeben.

Tabelle 10.

Verzeichnis der Elemententypen und der Elemente.

Ordnungszahl	Bezeichnung der Elemententypen gleich der der Elemente	Symbol	Atomgewicht	Ordnungszahl	Bezeichnung der Elemententypen gleich der der Elemente	Symbol	Atomgewicht
1	Wasserstoff . .	H	1,008	41	Niob	Nb	93,5
2	Helium	He	4,00	42	Molybdän . . .	Mo	96,0
3	Lithium . . .	Li	6,94	43	—	—	—
4	Beryllium . . .	Be	9,1	44	Ruthenium . .	Ru	101,7
5	Bor.	B	11,0	45	Rhodium . . .	Rh	102,9
6	Kohlenstoff . .	C	12,0	46	Palladium. . .	Pd	106,7
7	Stickstoff . . .	N	14,01	47	Silber.	Ag	107,88
8	Sauerstoff. . .	O	16,00	48	Cadmium . . .	Cd	112,4
9	Fluor	F	19,0	49	Indium	In	114,8
10	Vgl. nächste Seite			50	Zinn	Sn	118,7
11	Natrium . . .	Na	23,00	51	Antimon . . .	Sb	120,2
12	Magnesium . .	Mg	24,32	52	Tellur	Te	127,5
13	Aluminium . .	Al	27,1	53	Jod	J	126,92
14	Silicium . . .	Si	28,3	54	Xenon	X	130,2
15	Phosphor . . .	P	31,04	55	Cäsium	Cs	132,81
16	Schwefel . . .	S	32,06	56	Barium	Ba	137,37
17	Vgl. nächste Seite			57	Lanthan . . .	La	139,0
18	Argon	A	39,88	58	Cer	Ce	140,25
19	Kalium * . . .	K	39,10	59	Praseodym . .	Pr	140,9
20	Calcium. . . .	Ca	40,07	60	Neodym . . .	Nd	144,3
21	Scandium . . .	Sc	45,1	61	—	—	—
22	Titan	Ti	48,1	62	Samarium. . .	Sm	150,4
23	Vanadium. . .	V	51,0	63	Europium. . .	Eu	152,0
24	Chrom	Cr	52,0	64	Gadolinium . .	Gd	157,3
25	Mangan. . . .	Mn	54,93	65	Terbium . . .	Tb	159,2
26	Eisen.	Fe	55,84	66	Dysprosium . .	Dy	162,5
27	Kobalt	Co	58,97	67	Holmium . . .	Ho	163,5
28	Nickel	Ni	58,68	68	Erbium	Er	167,7
29	Kupfer	Cu	63,57	69	Thullium I . .	Tu I	168,5
30	Zink	Zn	65,37	70	Ytterbium . .	Yb	173,5
31	Gallium. . . .	Ga	69,9	71	Lutetium . . .	Lu	175,0
32	Germanium . .	Ge	72,5	72	Thullium II. .	Tu II	—
33	Arsen.	As	74,96	73	Tantal	Ta	181,5
34	Selen	Se	79,2	74	Wolfram . . .	W	184,0
35	Brom.	Br	79,92	75	—	—	—
36	Krypton . . .	Kr	82,92	76	Osmium . . .	Os	190,9
37	Rubidium * . .	Rb	85,45	77	Iridium. . . .	Ir	193,1
38	Strontium. . .	Sr	87,63	78	Platin	Pt	195,2
39	Yttrium . . .	Y	88,7	79	Gold	Au	197,2
40	Zirkonium . .	Zr	90,6	80	Quecksilber . .	Hg	200,6

Tabelle 10 (Fortsetzung).

Ordnungs-zahl	Bezeichnung der Elemententypen	Symbol	Bezeichnung der Elemente	Symbol	Atom-gewicht
10	Neon[1]) .	Ne	Neon.	Ne	20,00
			Metaneon	?	22,00
17	Chlor[2]) .	Cl	Noch nicht benannt .	?	35
				?	37
81	Thallium.	Tl	Thallium	Tl	204,0
			Actinium C″*	AcC″	(206)
			Thorium C″*	ThC″	208
			Radium C″*	RaC″	210
82	Blei . . .	Pb	Radium G	RaG (206,0 Pb)	206,0
			Blei	Pb	207,20
			Thorium D (Thorblei) .	ThD (208,0 Pb)	208,0
			Radium D*	RaD	210
			Actinium B*	AcB	(210)
			Thorium B*	ThB	212
			Radium B*	RaB	214
83	Wismut .	Bi	Wismut	Bi	208,0
			Radium E*	RaE	210
			Actinium C*	AcC	(210)
			Thorium C*	ThC	212
			Radium C*	RaC	214
84	Polonium	Po	Polonium (Radium F)*	Po (RaF)	210
			Actinium C′*	AcC′	(210)
			Thorium C′*	ThC′	212
			Radium C′*	RaC′	214
			Actinium A*	AcA	(214)
			Thorium A*	ThA	216
			Radium A*	RaA	218

Nur die unterstrichenen Atomgewichte sind experimentell ermittelt, die übrigen aus diesen auf Grund der genetischen Zusammenhänge berechnet. Die eingeklammerten Werte sind noch hypothetisch.

[1]) Das in der Natur vorkommende Mischelement „Neon“ hat das V. G. 20,2.

[2]) Das in der Natur verbreitete Mischelement Chlor hat das V. G. 35,46.

* Die durch einen Stern gekennzeichneten 39 Elemente sind radioaktiv oder unbeständig.

Tabelle 10 (Fortsetzung).

Ordnungszahl	Bezeichnung der Elemententypen	Symbol	Bezeichnung der Elemente	Symbol	Atomgewicht
85	—	—	—	—	—
86	Emanation	Em	Actiniumemanation * .	AcEm	(218)
			Thoriumemanation * .	ThEm	220
			Radiumemanation * .	RaEm	222
87	—	—	—	—	—
88	Radium .	Ra	Actinium X *	AcX	(222)
			Thorium X *	ThX	224
			Radium *	Ra	225,97
			Mesothorium 1 * . . .	$MsTh_1$	228
89	Actinium .	Ac	Actinium *	Ac	(226)
			Mesothorium 2 * . . .	$MsTh_2$	228
90	Thorium .	Th	Radioactinium * . . .	RdAc	(226)
			Radiothorium *	RdTh	228
			Ionium *	Io	230[1])
			Uran Y *	UY	(230)
			Thorium *	Th	232,15
			Uran X_1 *	UX_1	234
91	Protactinium .	Pa	Protactinium *	Pa	(230)
			Uran X_2 *	UX_2	234
92	Uran . .	U	Uran II *	U_{II}	234
			Uran I *	U_{I}	238,2

[1]) Die Bestimmung des Verbindungsgewichtes eines Ionium-Thoriumgemisches ergab den Wert 231,51 (27).

Literaturangaben und Anmerkungen.

Größere Werke aus dem Gebiete der Radioaktivität:

Mme P. Curie, Radioaktivität, 2 Bde., 1911 und 1912.

E. Rutherford, Radioaktive Substanzen und ihre Strahlungen, erschienen als II. Band des von E. Marx herausgegebenen Handbuches der Radiologie, 1913.

St. Meyer und E. v. Schweidler, Radioaktivität, 1916.

Speziell den Beziehungen zwischen Radioaktivität und Chemie sind gewidmet:

F. Soddy, Chemie der Radioelemente. I. Teil 1912, II. Teil 1914.

K. Fajans, Zusammenfassende Bearbeitung in der Physikalischen Zeitschrift **16**, 456 bis 486 (1915).

F. Henrich, Chemie und Technologie radioaktiver Stoffe, 1918.

Das Problem der Atomstruktur behandelt ausführlich:

A. Sommerfeld, Atombau und Spektrallinien, 1919.

Im folgenden wird öfters wegen näherer Literaturangaben auf das Werk von Meyer und v. Schweidler (Abkürzung M. und Schw.) und auf die Bearbeitung von Fajans (Abkürzung K. F.) verwiesen. Nur die allerneueste einschlägige Literatur ist nahezu vollständig berücksichtigt.

I.

(1) Nähere Begründung vgl. K. Fajans, Die Naturwissenschaften **6**, 751 (1918).

(2) Eine ausführliche Schilderung der Entdeckungsgeschichte des periodischen Systems findet man in C. Schmidt, „Das periodische System der chemischen Elemente“, 1917.

(3) Näheres vgl. 2 und jedes ausführlichere Lehrbuch der anorganischen Chemie. Bei der Verteilung der Elemente der ersten zwei Perioden auf die Untergruppen kommen die chemischen Analogieverhältnisse in Tabelle 9 richtiger zum Ausdruck als in Tabelle 1.

(4) Vielversprechende Aussichten auf eine Erklärung des periodischen Systems bieten die neueren Vorstellungen über die Struktur der Atome, auf die kurz im Kapitel XII eingegangen wird. Vgl. besonders W. Kossel, Ann. d. Phys. **49**, 229 (1916); Die Naturwissenschaften **7**, 339 (1919); R. Ladenburg, ebenda **8**, 5 (1920).

II.

(5) Literatur zu I a, b vgl. M. u. Schw. Kap. I und VI, 4, 5.

(6) Mathematisch wird dieses Zeitgesetz durch die Gleichung ausgedrückt

$$\frac{-\Delta N_t}{\Delta t} = \lambda N_t,$$

wo N_t die zur Zeit t vorhandene Zahl der Atome und $-\Delta N_t$ die Abnahme dieser Zahl während des kleinen Zeitintervalls Δt bedeutet. Der für ein bestimmtes Radioelement charakteristische Proportionalitätsfaktor λ gibt an, welcher Teil der vorhandenen Zahl der Atome in einer Zeiteinheit umgewandelt wird, die genügend klein gewählt wurde, um die vorhandene Zahl als praktisch konstant betrachten zu dürfen. Für längere Zeiträume nimmt dieses „logarithmische" Gesetz die Form an $\lambda t = \frac{1}{0{,}4343} \lg_{10} \frac{N_0}{N_t}$, wo N_0 sich auf den Anfang, N_t auf das Ende des Zeitintervalles t bezieht, $\lg_{10}$ den Logarithmus bei der Basis 10 bedeutet. Wählt man t gleich der Halbwertszeit (t_h), so ist

$$\lambda = \frac{1}{0{,}4343\, t_h} \lg_{10} 2 = \frac{0{,}693}{t_h}.$$

Für die Radiumemanation ist t_h = 3,85 Tage = 5550 Minuten, also pro Minute

$$\lambda = \frac{0{,}693}{5550} = \frac{1{,}25}{10\,000} \frac{1}{\text{Min.}},$$

d. h. in einer Minute wird etwas mehr als $^1/_{100}$ Proz. der jeweils vorhandenen Menge der Emanation umgewandelt. $1/\lambda$ stellt die mittlere Lebensdauer der Atome des betreffenden Elementes vor.

(7) Unter anderem sind im Laboratorium des Verfassers ausgedehnte unveröffentlichte Versuche nach dieser Richtung ausgeführt worden.

(8) Literatur zu II, 2 vgl. M. u. Schw. Kap. II, 1, 3, 4.

(9) Literatur zu II, 3 vgl. M. u. Schw. Kap. III, IV.

(10) Auf Grund neuer Untersuchungen von V. F. Hess und R. W. Lawson, Wien. Ber. **127** (IIa), 405 (1918), sendet 1 g Radiumelement (ohne Zerfallsprodukte) $3{,}72 \times 10^{10}$ α-Teilchen pro Sekunde aus, woraus sich seine Halbwertszeit zu 1580 Jahren ergibt.

(11) Literatur zu II, 4 vgl. M. u. Schw. Kap. II, 9 und IV, 10.

(12) Literatur zu II, 5 vgl. M. u. Schw. Kap. II, 7 und VI, 6.

(13) St. Meyer und E. v. Schweidler, Physik. Zeitschr. **19**, 30 (1918); Zeitschr. f. Elektrochem. **24**, 36 (1918).

(14) Literatur zu II, 6 vgl. M. u. Schw. Kap. VI. II, 10, V, 7.

III.

(15) Literatur zu III, 1 vgl. K. F. II und O. Hönigschmid, Zeitschr. f. Elektrochem. **22**, 21 (1916).

(16) Literatur zu III, 2 vgl. K. F. III, ferner G. v. Hevesy und F. Paneth, Wien. Ber. **123**, 1909 (1914); Th. W. Richards und N. F. Hall, Chem. News **115**, 284 und 294 (1917).

(17) Näheres über die Geschichte der Erforschung chemischer Eigenschaften der Radioelemente und ihrer Beziehungen zum periodischen System sowie über die Aufstellung der Verschiebungssätze vgl. K. F. III, IV, V, 1.

(18) Es sei erwähnt, daß die volle Klarheit über das Verhältnis der Radioelemente zum periodischen System im Jahre 1913 durch die fast gleichzeitig publizierten Arbeiten vom Verfasser und von F. Soddy erzielt wurde, kurz nachdem A. Russell eine ähnliche, jedoch unvollkommene Lösung vorgeschlagen hatte. Das experimentelle Material, betreffend die chemische Untrennbarkeit der Radioelemente voneinander und von gewöhnlichen Elementen ist seit der ersten Feststellung dieser Erscheinung bei Radiothorium und Thorium im Jahre 1907 durch H. Mc Coy und W. Ross zunächst nur langsam gesammelt worden und erst im Jahre 1913 hauptsächlich durch die Arbeiten von A. Fleck für alle nicht zu kurzlebigen Elemente gewonnen worden, wobei sich die erwähnte Einreihung ins periodische System vollkommen bestätigte. Der erste Versuch einer richtigen Deutung des Verhältnisses der Radioelemente zum periodischen System auf Grund der Existenz untrennbarer Elemente wurde von The Svedberg und D. Strömholm (1909) unternommen und dann von Soddy (1911) in bestimmtere Form gebracht. Vgl. auch (15).

IV.

(19) O. Hahn und L. Meitner, Phys. Zeitschr. **19**, 208 (1918); **20**, 127 (1919); Ber. d. deutsch. chem. Ges. **52**, 1812 (1919); F. Soddy und J. A. Cranston, Proc. Roy. Soc. London A. **94**, 384 (1918).

(20) Ältere Literatur zur Frage der Actiniumgenesis vgl. M. u. Schw. S. 376.

(20a) St. Meyer und V. Hess, Wien. Ber. **128** [IIa], 909 (1919).

V.

(21) Literatur zu V vgl. K. F. VI und IX, 2. Über andere bemerkenswerte Regelmäßigkeiten betreffend die Lebensdauer der Radioelemente vgl. M. u. Schw. VI, 12. Den Zusammenhang zwischen den in V. behandelten Regeln und der Zusammensetzung der Atomkerne behandelt W. Kossel, Phys. Zeitschr. **20**, 265 (1919).

VI.

(22) Literatur zu VI, 1, 2 vgl. K. F. VII, 1, 2; ferner Th. W. Richards und Ch. Wadsworth, Journ. Am. Chem. Soc. **38**, 2613 (1916); K. Fajans, Zeitschr. f. Elektrochem. **24**, 163 (1918); R. W. Lawson, Die Naturwissenschaften **5**, 429, 452 (1917).

(23) G. P. Baxter und F. L. Grover, Journ. Am. Chem. Soc. **37**, 1027 (1915).

(24) Nach Mitteilung von F. Soddy, Chem. News **107**, 97 (1913).

(25) Der Ausdruck „Verbindungsgewicht" wurde bis jetzt im doppelten Sinne gebraucht: erstens als gleichbedeutend mit „Äquivalentgewicht" (A. G. dividiert durch Wertigkeit), zweitens im Sinne A. W. Hoffmanns und W. Ostwalds, die ihn statt „Atomgewicht"

benutzten. Da für die Bezeichnung des mittleren A. G. eines Isotopengemisches der Ausdruck „Verbindungsgewicht" sehr passend ist, nach einer zweiten Bezeichnung für das Äquivalentgewicht dagegen kein Bedürfnis besteht, wäre es sehr zu wünschen, daß, wie O. Ohmann [Zeitschr. f. physik. u. chem. Unterricht 27, 330 (1914)] bereits aus didaktischen Gründen empfohlen hat, der Ausdruck „Verbindungsgewicht" ausschließlich im Sinne von Atomgewicht gebraucht wird. Vgl. K. Fajans, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektron. **14**, 348 (1917); F. Paneth, Zeitschr. f. physik. Chem. **92**, 678 (1917).

(26) Näheres zu VI, 3 vgl. F. Soddy und Mitarbeiter, Journ. Chem. Soc. **105**, 1402 (1914); Nature **94**, 615 (1915); **98**, 469 (1917); **99**, 244 (1917). O. Hönigschmid, Zeitschr. f. Elektrochem. **23**, 161 (1917) und **25**, 91 (1919). K. Fajans, ebenda **24**, 163 (1918); Ber. d. Heidelberg. Akad. 1918 (A), Abh. 3; R. W. Lawson, Wien. Ber. **126** (IIa), 721 (1917); St. Meyer, ebenda **127** [IIa], 1283 (1918).

VII.

(27) Analog ist der Befund von O. Hönigschmid und St. Horovitz, daß ein aus Joachimstaler Pechblende stammendes stark radioaktives Gemisch von Ionium und Thorium das V. G. 231,5 aufweist, während das A. G. des Thoriums 232,12 beträgt. Das A. G. des Ioniums berechnet sich aus dem des Radiums (vgl. Tabelle 2) zu 230,0. Spektroskopisch war dieses Gemisch von Ionium und Thorium vom gewöhnlichen Thorium nicht zu unterscheiden.

(28) Literatur zu VII vgl. K. F. IX, ferner: Th. R. Merton, Proc. Roy. Soc. A. **91**, 198 (1915); W. D. Harkins und L. Aronberg, Proc. Nat. Acad. of Science of Amer. **3**, 710 (1917); Th. W. Richards und Ch. Wadsworth, Journ. Am. Chem. Soc. **38**, 221, 1658 (1916); K. Fajans und M. Lembert, Zeitschr. f. anorg. Chem. **95**, 297 (1916); Richards und W. C. Schumb, Journ. Amer. Chem. Soc. **40**, 1403 (1918); G. v. Hevesy und F. Paneth, Wien. Ber. **124** (IIa), 381 (1915); H. Lachs, M. Nadratowska u. L. Wertenstein, Ber. d. Warschauer wiss. Ges. **9**, 652 (1916).

(29) Diese vom Verfasser [K. F. IX, 1 und Elster-Geitel-Festschrift, S. 623 (1915)] entwickelte Theorie der Eigenschaften der Isotopen stützt sich auf die aus dem Atommodell abgeleitete Annahme, daß im festen Zustande die Atomschwingungszahl (ν) bei Isotopen umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus ihrem A. G. (M) ist, also $\nu^2 M =$ konst. Durch den von Th. W. Richards [Science **49**, 1 (1919); vgl. auch M. Lembert, Zeitschr. f. Elektrochem. **26**, 59 (1920)] erbrachten Nachweis, daß die Schmelzpunkte 600,53° und 600,59° von $\overset{207,19}{\mathrm{Pb}}$ und $\overset{206,34}{\mathrm{Pb}}$ keinen außerhalb der Versuchsfehler liegenden Unterschied zeigen, hat die erwähnte Grundannahme eine wichtige Bestätigung erfahren. Denn der Schmelzpunkt hängt nach F. A. Lindemann außer von dem bei den Isotopen sehr nahe übereinstimmenden Atomvolumen nur noch von $\nu^2 M$ ab. Vgl. auch F. A. Lindemann, Phil. Mag. **37**, 523 und **38**, 173 (1919).

VIII.

(30) Literatur betreffend die Verdampfungserscheinungen bei Radioelementen vgl. St. Loria, Wien. Ber. **124** (IIa), 567 u. 1077 (1915); A. B. Wood, Proc. Roy. Soc. A. **91**, 543 (1915).

(31) Über die elektrochemischen Eigenschaften der Radioelemente vgl. u. a. den zusammenfassenden Bericht von F. Paneth, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektron. **11**, 451 (1915); K. F. Herzfeld, Phys. Zeitschr. **14**, 29 (1913); G. v. Hevesy, ebenda **16**, 52 (1915); Frau M. Wertenstein, Ber. d. Warschauer wiss. Ges. **10**, 771 (1917).

(32) Über kolloidale Lösungen der Radioelemente vgl. die Zusammenfassungen von T. Godlewski, Kolloid-Zeitschr. **14**, 229 (1914) und von F. Paneth (27) ferner H. Lachs, Kolloid-Zeitschr. **21**, 165 (1917); G. v. Hevesy, Wien. Ber. **127** (IIa), 1787 (1918).

(33) Näheres vgl. F. Paneth (27), K. Horovitz und F. Paneth, Wien. Ber. **123** (IIa), 1819 (1914); K. Fajans und F. Richter, Ber. d. deutsch. chem. Ges. **48**, 700 (1915).

IX.

(34) F. Paneth und G. v. Hevesy, Wien. Ber. **122** (IIa), 1001 (1913); G. v. Hevesy und Elisabeth Róna, Zeitschr. f. physik. Chem. **89**, 303 (1915).

(35) F. Paneth, Ber. d. deutsch. chem. Ges. **51**, 1704 (1918); Derselbe und E. Winternitz, ebenda S. 1728.

X.

(36) Näheres über die Kanalstrahlenanalyse vgl. die Monographie von J. J. Thomson· Rays of positive Electricity 1913, aus der Fig. 3 und 4 reproduziert sind; W. Wien, Kanalstrahlen in Bd. IV des von E. Marx herausgegebenen Handbuches der Radiologie, 1917. Über Metaneon vgl. F. W. Aston, Physik. Zeitschr. **14**, 1303 (1913); Derselbe und F. A. Lindemann, Phil. Mag. **37**, 523 (1919). Die neuesten Mitteilungen von Aston sind in Nature **104**, 334, 393 (1919) zu finden.

XI.

(37) Über Röntgenstrahlenspektroskopie vgl. die zusammenfassenden Bearbeitungen von M. Siegbahn, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektron. **13**, 296 (1916); E. Wagner, Physik. Zeitschr. **18**, 405, 432, 461, 488 (1917); ferner das auf S. 104 zitierte Buch von Sommerfeld.

XII.

(38) Literatur zu XII, 1 vgl. K. F. VIII. Eine leichtfaßliche Darstellung vgl. L. Graetz, Die Atomtheorie in ihrer neuesten Entwicklung (1918) und Sommerfeld (37).

(39) Näheres über die Theorie der Spektren vom Standpunkte des Atommodells und der Quantentheorie vgl. E. Wagner (37) und P. Epstein, Die Naturwissenschaften **6**, 230 (1918), und besonders das Buch von A. Sommerfeld (37).

(39a) Auch Th. R. Merton teilte kürzlich mit [Nature **104**, 406 (1919)], daß die Wellenlänge der Spektrallinie 405,8 $\mu\mu$ beim Blei aus Pechblende (Uranblei) um 0,000 50 ± 0,000 07 $\mu\mu$ größer, beim Blei aus Thorit (Thoriumblei) um 0,000 22 ± 0,000 08 $\mu\mu$ kleiner als beim gewöhnlichen Blei ist. Es sei erwähnt, daß die Bohrsche Theorie der Spektrallinien einen derartigen Unterschied zwischen den Isotopen wegen der Mitbewegung der verschieden schweren Kerne erwarten läßt, doch ist der beobachtete Effekt etwa 100 mal größer als der nach Bohr unter der Voraussetzung der Punktförmigkeit und gleicher Ladung der Kerne berechenbare. Da die Kerne jedoch endliche Dimensionen besitzen (Durchmesser 10^{-13} bis 10^{-12} cm), wird deren bei den Isotopen verschiedene Zusammensetzung Unterschiede in der Wellenlänge der optischen Spektrallinien bedingen können, die schätzungsweise (Fajans, Elster-Geitel-Festschrift, S. 527) bis etwa 10^{-3} Proz. reichen können. Die gefundene Differenz von 10^{-4} Proz. dürfte deshalb auf die verschiedene Struktur der Kerne zurückzuführen sein.

(40) Näheres zu XII, 4 vgl. W. D. Harkins und E. D. Wilson, Zeitschr. f. anorg. Chem. **95**, 1 (1915); W. Lenz, Bayer. Akad. 1918, S. 355; Die Naturwissenschaften **8**, 181 (1920).

(40a) Daß nicht alle Abweichungen von der Proutschen Hypothese auf Isotopie zurückführbar sind, ergibt sich unter anderem aus Versuchen von O. Stern und M. Volmer [Ann. d. Phys. **59**, 225 (1919)]. Das A. G des Sauerstoffs (16,00) ist kein ganzes Vielfaches von dem des Wasserstoffs (1,008); trotzdem konnte durch fraktionierte Diffusion keines dieser Elemente als Gemisch von Isotopen erwiesen werden.

XIII.

(41) C. T. R. Wilson, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektron. **10**, 34 (1913); D. Bose, Physik. Zeitschr. **17**, 388 (1916).

(42) Über Nebulium vgl. B. H. Bourget, Ch. Fabry und H. Buisson, C. R. **158**, 1017 (1914); J. W. Nicholson, ebenda, S. 1322.

(43) Vgl. z. B. die sorgfältige Arbeit von J. N. Collie, H. S. Patterson und J. Masson, Proc. Roy. Soc. A. **91**, 30 (1915).

(44) Näheres über *H*-Teilchen vgl. M. u. Schw. III, 11 B und 20 A; C. G. Darwin, Phil. Mag. **27**, 499 (1914); E. Marsden, ebenda, S. 824; Derselbe und W. C. Lantsberry, ebenda **30**, 240 (1915); E. Rutherford, ebenda **37**, 537—587 (1919); W. Lenz (40).

XIV.

(45) Näheres vgl. F. Paneth, Zeitschr. f. physik. Chem. **91**, 171 (1916); **92**, 677 (1917); **93**, 86 (1918); Die Naturwissenschaften **6**, 645 (1918); K. Fajans, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektron. **14**, 314 (1917); **15**, 101 (1918); Die Naturwissenschaften **6**, 750 (1918); die 1. Auflage

dieser Schrift; R. Wegscheider, Zeitschr. f. physik. Chem. **92**, 741 (1918); **93**, 380 (1919).

(46) Es wurde kürzlich hervorgehoben, daß die von einem Anhänger der Betrachtung der Isotopen als dasselbe Element vorgeschlagene Definition: „Ein Element ist ein Stoff, der durch kein chemisches Verfahren zerlegt werden kann", auch nach der Zerlegung des Stickstoffs (mit Hilfe einer physikalischen Methode) ihre Geltung behält. Nun ist aber diese Definition schon aus dem Grunde unannehmbar, weil nach ihr auch die mit keiner chemischen Methode zerlegbaren Gemische der chemisch trägen Edelgase, z. B. von Neon und Argon, zu Elementen gerechnet werden müßten.

XV.

(47) Über das Verhältnis der seltenen Erdmetalle zum periodischen System vgl. R. Vogel, Zeitschr. f. anorg. Chem. **102**, 177 (1917).

(48) Über die Radioaktivität des Kaliums und Rubidiums vgl. die neueste diesbezügliche Arbeit von O. Hahn und M. Rothenbach, Physik. Zeitschr. **20**, 194 (1919).

Autorenregister.

(Die eingeklammerten Zahlen des Autoren- und Sachregisters beziehen sich auf die Nummern der Literaturangaben und Anmerkungen S. 104 ff.)

Sachregister.

